TÉCNICA

Revista de Engenharia

Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

nº1/94 Junho 94

ISSN 0040-1714 pvp 400.00

TAGUSPARK

PARQUE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

OBJECTIVOS GENÉRICOS

- Aproximar as comunidades científico/tecnológica e empresarial.
- Criar um ambiente favorável à inovação.
- Promover a criação de empresas baseadas em conhecimento.
- Atrair empresas nacionais e estrangeiras de alta tecnologia.
- Promover actividades de ensino e formação em ambiente empresarial real.

TAGUSPARQUE, S.A. - Rua Cmdt. Cordeiro Castanheira, 41-2º • 2780 OEIRAS
Tel.: 441 69 31 • Fax: 441 69 36

índice

Editorial 3
ARTIGO CONVIDADO
Aceleradores de Partículas por Interacção Laser – Plasma: J.T. Mendonça e L. Oliveira e Silva 5
COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS
Termodinânica para Engenharia Mecânica: Finalidades e Objectivos: João Ventura 13
Chemistry, Geology and Materials Science of Geothermal Systems: M.O.S.P. Caldeira and C.A.C. Sequeira 27
Nil Contribution of the Cosmological Constant to the Plaine Gravitational Waves in General Relativity: K.S. Adhav and T.M. Karade 33
A Cilindrically Symmetric Cosmological Model in Bimetric Relativity: Shailendra Deo 37
A Reflectmetric System for the Tokomak Isttok: P. Varela, A. Silva, S. Verganota, F. Serra, M.E. Manso, J.A. Cabral and C.A.F. Varandas 41
The Difficulty of Attributing a Physical Significance to Quantities Work and Heat in the First Principle of Thermodynarmics. The Resolution of an Entropy Maximization Controbersy: Rodrigo de Abreu 53
Detecção de Solutos em Cromatografia Iónica – Detector Condutimétrico: J. Costa Pessoa 63
Natureza e Estrutura da Revista Técnica: 91

FICHA TÉCNICA:

TÉCNICA, revista de Engenharia
Publicação trimestral - p.v.p. 400$00
distribuição gratuita aos sócios da AEIST e aos docentes do IST
ISSN 0040-1714
Depósito legal 79 269/94
Registo de Imprensa 101407

Propriedade
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, P – 1000 Lisboa, Portugal
Contrib. N.º 501 055 606

Administração, Serviços Comerciais e Assinaturas
Av. Rovisco Pais, P - 1000 Lisboa, Portugal
Telef: 851 18 48 10 18/841 73 62
Fax: 851 18 47 40 14/849 92 47
Correio Electrónico – aeistdoc © eta.ist.utl.pl

Direcção
Director Científico: Manuel Abreu Faro
Director Executivo: Luís Lopes
Secretariado: GIRE / Paula Carvalho

Concepção Gráfica
Traça Design
Praça da Alegria, 6 - 2.º Esq. – 1200 Lisboa
Telef: (01) 343 13 21
Fax: (01) 343 13 24

Publicidade
Dossier Comunicação e Imagens, Lda.
R. Eça de Queirós, 18 – 2.º Lisboa
Telef: (01) 355 92 94/5 – 353 73 21
Fax./ Telef: (01) 353 73 16

Execução Gráfica
Gráfica Maiadouro, S.A.
Rua Padre Luís Campos, 686
VERMOIM – Apart. 6 – 4471 Maia Codex
Telef. (02) 948 02 45/88 05/88 30
Fax: (02) 948 77 07
Tiragem: 5000 ex.

Apoio
Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico

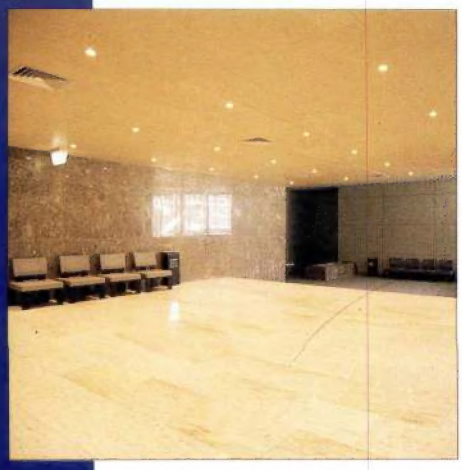
Um novo espaço de intervenção cultural em Lisboa

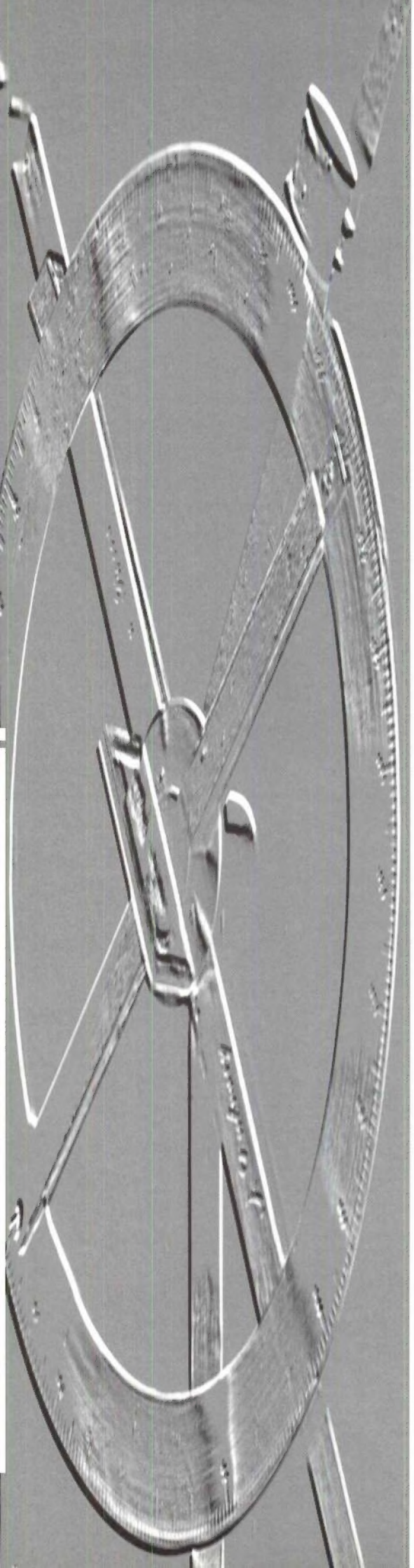
Congressos
Seminários
Encontros
Actividades
Culturais

IST Centro de Congressos

- **3 ANFITEATROS:** *2 de 80 lugares e 1 de 320 lugares*
- **4 SALAS DE REUNIÕES:** *de 12 a 120 lugares*
- **SALA DE AUDIO E VIDEO**
- **2 GRANDES ÁREAS DE RECEPÇÃO**

Informações: *Telef.: 841 80 69 Fax: 847 08 58*





EDITORIAL

A Técnica recupera tempo perdido.
Com outras formas e cores indicia
a essência e a qualidade do seu conteúdo.
Ainda não somos o que seremos.
Isso resultará, acreditamos,
das normas que hoje se publicam.
Economizar espaço, é valorizar.
É dignificar o que se publica e onde se publica.
Respeitámos neste número,
quase que integralmente,
a extensão dos originais aceites.
A partir de aqui será diferente.
Nesta atitude,
com o constante apoio
do Conselho Directivo do I.S.T.,
com a compreensão da Direcção da A.E.I.S.T.,
continuaremos a ser
um espaço de intervenção que,
além do mais,
encorajará os mais novos
ao acto
responsável
de publicar.

APGEI ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE GESTÃO E ENGENHARIA INDUSTRIAL

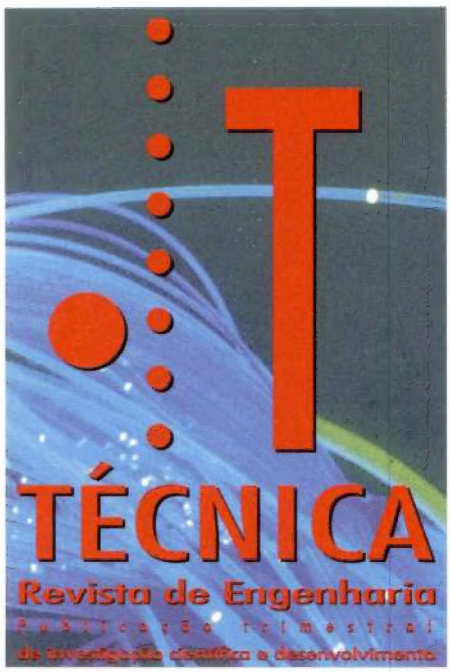
OBJECTIVOS

- Promover a divulgação de novas tecnologias e métodos de gestão e engenharia industrial;
- Melhorar a produtividade das pessoas dentro das organizações, através de acções de formação.

PLANO DE FORMAÇÃO

. Técnicas de Venda;
. Marketing de Produtos Industriais;
. Sistemas de Gestão de Energia;
. Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho;
. Relações de Trabalho e Gestão da Produção;
. Técnicas de Organização e Estudo do Trabalho;
. Introdução à Produção em Fluxo;
. Gestão Integrada de Recursos Humanos;
. Comunicação e Negociação;
. Formação Pedagógica de Formadores;
. «Presentational Skills».

Rua de Salazares, 842 - 4100 PORTO - Tels. (02) 617 87 02 - 617 78 31 - Fax (02) 617 84 68



Aqui poderia estar um anúncio seu.

Para mais informações contacte-nos pelos telefs.: (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef.: (01) 353 73 16
ou escreva-nos para: DOSSIER, comunicação e imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18-2.° – 1000 LISBOA

ACELERADORES DE PARTÍCULAS POR INTERACÇÃO LASER-PLASMA

J. T. Mendonça e L. Oliveira e Silva
Centro de Electrodinâmica, Instituto Superior Técnico, 1096 Lisboa Codex

RESUMO

Neste artigo descrevem-se os mecanismos de aceleração de partículas carregadas em plasmas criados por lasers ultra intensos e apresenta-se o princípio físico subjacente a tecnologia dos sistemas laser TeraWatt. Descreve-se ainda o sistema TeraWatt a instalar no IST para a realização de experiências de aceleração de fotões, geração de ondas plasma electrónicas de grande amplitude e aceleração de electrões.

Abstract

In this paper, we describe the mechanisms of plasma particle acceleration in laser-plasma interaction schemes and we present the technology of TeraWatt laser system, and its underlying physical principle. The TeraWatt system to be installed at IST is described. This system will be the basis for photon acceleration experiments, laser excitation of large-amplitude plasma waves, and electron acceleration experiments to be undertaken at IST.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos sessenta anos, os avanços na tecnologia dos aceleradores de partículas têm sido consideráveis. Acelerando partículas carregadas até velocidades próximas da velocidade da luz e fazendo-as colidir, tem permitido avanços significativos no conhecimento das forças fundamentais da natureza, da origem do universo e da estrutura da matéria. O aumento da energia das partículas aceleradas tem permitido estudar as reacções nucleares no interior das estrelas gigantes, o núcleo das estrelas de neutrões e, com as máquinas mais recentes, as condições do universo até ao instante $t=10^{-9}$ s após a sua criação tal como o descreve o modelo do big-bang. No entanto, os aceleradores actualmente em construção ou em projecto já começam a aproximar-se dos limites tecnológicos actuais e os custos orçamentais atingem valores incompatíveis com o estado actual da economia mundial. De facto, o projecto de construção do maior acelerador de partículas do mundo (SSC – Superconducting Supercollider) foi abandonado devido aos elevados custos envolvidos na sua construção [1]. O *SSC* estaria apetrechado com um anel de aceleração de 87 km que possibitaria a aceleração de partículas até aos 40 TeV. O elevado investimento necessário é, em parte, devido ao próprio conceito de acelerador que se pretendia implementar: as partículas são guiadas por campos magnéticos ao longo do túnel de aceleração e aceleradas por campos eléctricos intensos. Para reduzir as dimensões de um tal acelerador seria necessário aumentar consideravelmente a intensidade dos campos magnéticos e eléctricos necessários para guiar e acelerar as partículas carregadas. Contudo, os limites tecnológicos não permitem encarar esta hipótese com esperança. As forças magnéticas nos aceleradores de partículas convencionais já são da ordem de grandeza das forças que preservam a estrutura do material magnético. Por outro lado, os campos eléctricos utilizados atingem valores próximos dos campos de ligação dos electrões nos átomos, o que significa que campos eléctricos mais elevados arrancariam os electrões dos átomos que constituem a estrutura dos aceleradores de partículas destruindo esses materiais. Desta forma, tal como anteriormente se passou dos aceleradores electrostáticos para os betatrões e ciclotrões, e destes até às máquinas actuais (os aneis de colisão), é necessário agora explorar novos conceitos de aceleradores baseados em processos físicos novos, como é o caso dos aceleradores de partículas a plasma.

2. ACELERADORES A PLASMA

O plasma é um estado da matéria onde os electrões se encontram dissociados dos átomos que constituem o meio. Apesar deste facto, o meio é globalmente neutro sendo possível criar zonas deslocalizadas de carga d correspondendo a zonas de carga negativa positiva i.e. zo-

nas em que a densidade electrónica é superior ou inferior à densidade iónica. Nos aceleradores de partículas a plasma, os campos eléctricos presentes não estão limitados pelas energias de ligação dos electrões aos átomos. Estes aceleradores baseiam-se no princípio de que as partículas carregadas são aceleradas por campos eléctricos intensos, no interior do plasma. Dado que o plasma corresponde a um estado da matéria em que as energias dos electrões são suficientes para estes estarem completamente dissociados dos átomos a que pertenciam, e portanto o plasma já se encontra ionizado, os campos eléctricos que o plasma pode sustentar são bastante mais elevados já não existe a possiblidade de dissociação electrónica. Esta é a vantagem decisiva deste novo conceito de acelerador. Com efeito, teoricamente, um plasma pode sustentar campos eléctricos 10000 vezes mais fortes *(10^8-10^9 V/cm)* do que aqueles presentes nos aceleradores convencionais, para valores típicos da densidade electrónica. Isto significa que se campos eléctricos desta ordem puderem ser produzidos num plasma ao longo de uma distância considerável, um acelerador a plasma com algumas centenas de metros de comprimento será capaz de produzir resultados semelhantes às previstas para o *SSC*. Vejamos resumidamente os antecedentes históricos dos actuais conceitos de aceleradores a plasma. A aceleração de partículas carregadas por campos magnéticos movendo-se no espaço e por ondas electromagnéticas foi inicialmente considerada por Fermi [2] e McMillan [3] quando nos anos 40 e 50 se ocuparam da análise dos raios cósmicos. O mesmo problema foi posteriormente tratado por Sagdeev [4], considerando agora o plasma e não o vazio como o meio no qual se movem as partículas e se geram os campos. Esta inclusão do plasma na problemática da aceleração foi particularmente importante, dado que o plasma permite a excitação de campos eléctricos extremamente elevados. Com efeito, uma pequena perturbação é suficiente para estabelecer no plasma uma oscilação da densidade electrónica, de frequência $\omega_p \alpha \sqrt{n_e}$, em que ω_p se designa por frequência plasma e ne é a densidade electrónica. Estas oscilações ou ondas do plasma apresentam uma propriedade fundamental: a sua frequência é praticamente independente do comprimento de onda. Daqui resulta que a velocidade de fase das oscilações do plasma pode tomar qualquer valores arbitrariamente elevados desde que o comprimento de onda seja escolhido de forma apropriada. Por outro lado, a velocidade de grupo das oscilações plasma-electrónicas é nula e desta forma, assim que a onda plasma electrónica é estabelecida no plasma, a sua amplitude mantém-se estacionária até ser amortecida ou destruída por algum processo não linear. Observe-se ainda que o conceito de aceleração de partículas que está subjacente à física das altas energias, afasta-se bastante do conceito intuitivo de variação da velocidade da partícula ao longo do tempo. Nos aceleradores, as partículas movem-se a velocidades próximas da velocidade da luz e quando absorvem energia por interacção com os campos, são aceleradas na medida em que a sua massa efectiva aumenta, de acordo com a teoria da relatividade restrita. A velocidade das partículas aceleradas apemas varia ligeiramente uma vez que está perto do limite físico que é a velocidade da luz. Desta forma quando se pretende acelerar partículas relativistas é necessário que as oscilações plasma electrónicas se movam com velocidades próximas de c de modo a que os electrões a acelerar acompanhem as ondas plasma electrónicas.

3. BEAT-WAVE E WAKEFIELD

Apesar dos plasmas permitirem a existência de ondas com velocidades de fase arbitrária, e com campos eléctricos intensos, resta resolver o problema da excitação dessas

ondas. Dois métodos foram propostos. O primeiro método, denominado por beat-wave, baseia-se na co-propagação através do plasma de dois feixes laser de frequências ω_1 e ω_2. A diferença de frequência ω_1-ω_2 é escolhida de modo a coincidir com a frequência plasma: ω_1-ω_2=ω_p. A velocidade de fase das ondas plasma electrónicas excitadas por este processo é igual à velocidade de grupo do batimento dos dois feixes laser que, para frequências ω_1 e ω_2 muito superiores à quando comparadas com a frequência plasma ω_p é muito próxima de c. Este método foi proposto por Tajima e Dawson em 1979 [5].

O segundo método baseia-se na propagação de um impulso laser de duração $\pi \approx \frac{2\pi}{\omega_p}$ através de um plasma. Nesta situação, o laser deixa atrás de si uma espécie de rasto que é essencialmente uma oscilação plasma electrónica, de velocidade de fase igual à velocidade de grupo do impulso laser. A amplitude da onda plasma electrónica será proporcional à intensidade do impulso laser. Este método designa-se por aceleração de partículas por *wake field* [6].

As dificuldades experimentais associadas à aceleração de partículas por *beat wave* são óbvias. Em primeiro lugar, é necessário garantir que a diferença de frequência entre os dois feixes laser seja igual à frequência plasma electrónica do plasma onde os dois feixes se propagam. Por outro lado, a duração dos impulsos laser tem que ser suficientemente pequena de forma a não perturbar o movimento dos iões do plasma. O crescimento das ondas plasma electrónicas por *beat wave* é um processo não linear que é ressonante quando ω_1-ω_2=ω_p [7]. Quando os dois feixes laser se propagam no plasma, actuam sobre os electrões forças não lineares $j_1^{\perp} \times B_2^{\perp}$ e $j_2^{\perp} \times B_1^{\perp}$, que dependem da frequência plasma. Estas forças são paralelas e anti-paralelas à direcção de propagação dos impulsos laser e são responsáveis pelo crescimento ressonante das ondas plasma electrónicas com o número de onda k=k_1-k_2 e frequência ω_p. Este crescimento será tanto mais eficiente quanto menor for a diferença entre a frequência plasma electrónica do meio e a diferença de frequência ω_1-ω_2. Apesar de ser possível criar plasmas com densidades bem definidas, uma pequena diferença é suficiente para que não se atinja a situação de ressonância e para que a geração da onda plasma electrónica de grande amplitude não se observe. O outro problema experimental já referido prende-se com a duração dos impulsos laser. Com efeito, se a duração dos impulsos laser for suficientemente pequena (τ < *0.1ns*) o campo eléctrico do laser arrastará somente os electrões e os iões, de massa muito superior à dos electrões, sofrerão uma aceleração bastante mais pequena durante um intervalo de tempo reduzido; consequentemente, o movimento iónico será desprezável. Caso esta situação não se verifique, o movimento iónico é responsável pela inibição do crescimento da onda plasma electrónica através do crescimento de instabilidades iónicas e do desenvolvimento de turbulência plasma.

Apesar destes condicionantes, os resultados experimentais relativos a este método são bastante animadores. Uma experiência conduzida por C.Joshi em U.C.L.A. [8] revelou a presença de campos eléctricos da ordem dos 10^8 *V/cm* em ondas electrostáticas propagando-se com velocidades de fase próximas de *c*. Nesta experiência utilizou-se um laser de CO_2 de 70 J num impulso de 300 ps que pode ser divido em dois feixes de comprimentos de onda *10.29 μm* e *10.59 μm* de energias 10 J e 60 J, respectivamente. O plasma é criado através de uma descarga de arco numa câmara contendo Hidrogénio à pressão de 110-200 mTorr. Os dois feixes foram opticamente misturados no

plasma criando ondas plasma de grande amplitude. As características das ondas plasma electrónicas criadas foram analizadas através de diagnósticos ópticos (Difusão de Thomson). Injectaram-se electrões de energia 2.1 MeV que foram acelerados até energias próximas dos 30 MeV, ao longo de um 1 cm. O conceito de aceleração de partículas por *beat-wave* não é exclusivo da física dos aceleradores a plasmas; para regimes de energia mais baixos utiliza-se o mesmo conceito na geração de corrente não indutiva em plasmas de fusão nuclear [9]. A aceleração de partículas por *wake field* é, aparentemente, mais fácil de implementar do ponto de vista experimental embora não tenha ainda sido demonstrado experimentalmente. O fenómeno físico que explica a geração de ondas plasma electrónicas por *wake field* é extremamente simples: um feixe laser que se propaga num plasma empurra os electrões que encontra ao longo do seu percurso. Após atravessar essa região, forma-se uma zona de carga espacial positiva com a dimensão espacial do impulso laser e consequentemente cria-se um campo eléctrico que arrasta os electrões para a zona de carga positiva e desencadeia a oscilação plasma electrónica. Esta onda electrostática move-se com a velocidade de grupo do impulso laser e o seu crescimento não não é condicionado por nenhum fenómeno ressonante. Apenas é necessário garantir que o inverso da duração do impulso laser seja da ordem da frequência plasma electrónica e que a energia do impulso laser seja elevada. Este facto permite maior flexibilidade quanto às características do plasma onde serão geradas estas oscilações, ao contrário do que sucede no beat-wave. No entanto, levantam-se problemas técnicos importantes relativamente às características do impulso laser (duração inferior a 1 ps e energia da ordem das centenas de mJ) a utilizar nas experiências de *wake field*. As experiências com estes lasers iniciaram-se recentemente e ainda foram conclusivas: a presença do *wake field* ainda não foi detectada. Actualmente, preparam-se experiências de aceleração de partículas por plasmas em U.C.L.A. e Lawrence Livermore Laboratory (U.S.A), LULI-École Polytechnique (França), Rutherford Appleton Laboratory (UK), Universidade de Osaka (Japão). Os trabalhos preparatórios para a experiência portuguesa de aceleração de partículas por *wake field* foram iniciados em Janeiro de 1994 no Centro de Electrodinâmica do IST.

4. O SURFATRÃO

A aceleração de partículas por ondas plasma electrónicas de grande amplitude apresenta dois aspectos técnicos fundamentais. O primeiro aspecto prende-se com o próprio crescimento das ondas plasma electrónicas e com a sua amplitude máxima. De facto, existe um limite máximo para a energia que uma onda plasma electrónica pode transmitir a um electrão. Esse limite é estabelecido pelo campo eléctrico máximo que pode ser produzido no plasma. Este limite corresponde às oscilações máximas de densidade electrónica que é determinada pelas condições em que a oscilação é destruída por processos não lineares (*wave breaking*) [10]. Esta destruição é semelhante à que ocorre nas ondas do mar quando a crista da onda desaba na base da onda — rebentação. Teoricamente, prevê-se que a amplitude máxima, para a qual não existe rebentação da onda plasma electrónica, é proporcional à raiz quadrada da densidade electrónica, o que nos permite obter valores do campo eléctrico da ordem das dezenas de GV/m.

O segundo aspecto relaciona-se com a dinâmica do electrão no campo criado pela onda. Verifica-se

intuitivamente, através de uma analogia para o caso clássico de uma partícula sujeita a um potencial sinusoidal [11], que o tempo de interacção entre a partícula carregada e a onda electrostática é reduzido se a velocidade do electrão for superior à velocidade da onda plasma electrónica. Apesar destas velocidades serem bastante próximas, o electrão ultrapassará a onda plasma e o tempo de interacção assim como a energia cedida pela onda ao electrão serão reduzidos. A forma de evitar esta situação consiste em prolongar o tempo de interacção do electrão com a onda. Tal como um surfista se move com um determinado ângulo em relação à direcção de propagação da onda em que se desloca de forma a aumentar o tempo de interacção com a onda e a aumentar a sua velocidade, também um electrão movendo-se obliquamente em relação à direcção de propagação da onda estará mais tempo sob a influência dessa onda e, portanto, a energia de interacção será mais elevada. Neste caso, a velocidade dos electrões tem que ser maior que a velocidade da perturbação de forma a que os electrões acompanhem a onda. Com o movimento oblíquo, o desfasamento entre o electrão e a onda, que aumentaria continuamente, devido à diferença de velocidades, é eliminado. A forma de impôr aos electrões um movimento oblíquo em relação à direcção de propagação da onda consiste em aplicar um campo magnético vertical e constante ao sistema:o electrão fica sujeito a uma força de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ cuja direcção é perpendicular à direcção de propagação da onda electrostática (Figura 1). Esta técnica, proposta por Katsouleas e Dawson em 1983 [12], designa-se por Surfatrão, por analogia óbvia com a modalidade desportiva que serviu de inspiração ao conceito.

A situação mais geral de uma partícula carregada propagando-se no campo de uma onda electrostática sob acção de um campo magnético constante é bem conhecida [13] e verifica-se que, em determinadas condições, a aceleração de partículas passa a ser estocástica. Neste regime, um feixe de electrões injectado com uma determinada velocidade sofrerá um alargamento do seu espectro de energia. Embora exista aceleração das partículas carregadas nesta situação, a sua eficiência é reduzida e as energias alcançadas consideravelmente mais baixas do que na aceleração regular.

5. LASERS DE TERAWATT

A aceleração de partículas por plasma desenvolveu-se nos últimos anos de maneira acentuada devido aos avanços tecnológicos no domínio dos lasers de impulsos ultra curtos e intensidades elevadas. Desde 1985, é possível conceber lasers com durações inferiores ao picosegundo e energias da ordem do Joule [14]. A estes valores correspondem potências superiores ao TeraWatt. As energias disponíveis e a sua duração tornam estes sistemas ideais para as experiências de aceleração de partículas em plasmas e, de forma geral, para o estudo dos fenómenos de interacção de campos electromagnéticos ultra-intensos com a matéria. Dada a intensidade dos campos eléctricos gerados pelo laser de TeraWatt, o estudo dos fenómenos físicos de interacção laser-matéria neste regime requer um tratamento relativista e não linear. Por outro lado, esses mesmos lasers permitem estudos em áreas tão distintas como a dinâmica das reacções químicas ultra-rápidas, geração de harmónicas em gases, fontes de raios-x para a biologia e medicina, espectroscopia rápida, diagnósticos de fusão nuclear, caos quântico, óptica quântica, geração de luz branca em líquidos, etc.

A produção de impulsos de duração inferior ao picosegundo está asso-

ciada a uma técnica proposta em 1985 por Moorou e designada por CPA (*Chirped Pulse Amplification*). O príncipio físico subjacente a esta técnica é simples; se pretendemos impulsos extremamente curtos então a largura espectral desses impulsos deve ser bastante elevada ($\Delta\omega\Delta t \leq 1$). Por outro lado, os amplificadores não suportam potências excessivamente elevadas. A técnica CPA resulta, em traços gerais, destas limitações: o impulso inicial do laser é alargado antes de ser amplificado de modo a não danificar os amplificadores. Seguidamente, o impulso é comprimido até durações próximas daquelas com que foi injectado na fase de alargamento. À saída do sistema, a potência atinje valores superiores ao TeraWatt: com tecnologia Ti:S as durações podem ir até às dezenas de femtosegundo e dezenas de milijoule enquanto que com osciladores de Nd atinjem-se energias de 10J com impulsos de 1 picosegundo.

O sistema CPA-TeraWatt de Lisboa (Figura 2), em fase de projecto e montagem, é um exemplo desta técnica. O impulso de um oscilador Nd:YLF bombeado por um laser de díodo é alargado por meio de redes de difracção e seguidamente amplificado num amplificador regenerativo de Ti:S e num amplificador de Nd:Vidro. Após a fase de amplificação é comprimido com a ajuda de redes de difracção, resultando num impulso laser de energia 1J e duração inferior a 1ps, com um comprimento de onda da ordem de 1 micron (infra vermelho próximo).

Este sistema constituirá o equipamento base para a experiência portuguesa de aceleração de partículas em plasmas que será desenvolvida em colaboração com LULI-École Polytechnique e RAL. Os objectivos do projecto português consistem em instalar este sistema laser em Portugal, observar experimentalmente a presença do *wake field* e desenvolver seguidamente uma experiência de aceleração de electrões. Pretendem-se ainda, paralelamente, avançar com experiências de aceleração de fotões com o objectivo de desenvolver novas fontes de radiamento. Tal como na aceleração de partículas, a interacção de um fotão com uma perturbação da densidade electrónica do plasma que se desloca rapidamente no espaço leva à alteração da energia dos fotões que interagem com essa perturbação. Esta alteração tem como consequência uma variação da frequência do fotão dependente da velocidade da perturbação [15]. Desta forma é possível conceber fontes de radiamento sintonizáveis, desde as micro-ondas até aos raios-X. As potencialidades do sistema laser de TeraWatts ainda poderão ser ainda exploradas por outros grupos e outros centros de investigação portugueses da área da Química e da Biologia. Uma parte relevante do tempo de utilização do sistema será consagrada a estudos de IDE na área da utilização de lasers pulsados em projectos industriais. Pretende-se desta forma, complementar a actividade de investigação associada a este projecto com actividades de Desenvolvimento Experimental que resultem naturalmente do esforço realizado em torno dos projectos de índole fundamental.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentaram-se os conceitos que estão subjacentes aos novos mecanismos de aceleração de partículas carregadas em plasmas. As vantagens que estas técnicas apresentam foram comparadas com as limitações técnicas e financeiras que as actuais experiências de altas energias comportam. A aceleração de partículas em plasmas supõe a geração de ondas electrostáticas de grande amplitude e velocidade de fase próximas de *c*; concebem-se actualmente dois mecanismos para a criação dessas estruturas em plasmas — *beat wave*

e *wake field*. Falou-se também do surfatrão, o esquema proposto para evitar o progressivo desfasamento entre a partícula carregada e a onda electrostática. Finalmente, descreveu-se a tecnologia actual de lasers de grande potência que permite a realização destas experiências e apresentou-se sumariamente o sistema laser a instalar proximamente no IST, assim como as características genéricas da actividades a desenvolver no âmbito deste projecto.

7. REFERÊNCIAS

[1] J.Horgan, Sci.American **270**, 71 (Feb 94)

[2] E.Fermi, Phys.Rev. **75**, 1169 (1949)

[3] E. M. McMillan, Phys. Rev. **79**, 498 (1950)

[4] R. Z. Sagdeev and G. M. Zaslavsky, Regular and chaotic dynamics of particles in a magnetic field. In: *Nonlinear Phenomena in Plasma Physics and Hydrodynamics*, ed. R.Z.Sagdeev (Mir, Moscow, 1986)

[5] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979)

[6] P.Chen *et al*, Phys. Rev. Lett. **54**, 693 (1985)

[7] J. T. Mendonça, J. Plasma Physics **34**, 115 (1985)

[8] C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson, M. Everett, A.Lal, W. P. Leemans, R. Williams, and C. Joshi, Phys. Rev. Lett. **70**, 37 (1993)

[9] J. T. Mendonça and R. M. O. Galvão, J. Plasma Physics **35**, 483 (1986)

[10] R. Z. Sagdeev, A. D. Usikov, and G. M. Zaslavsky, *NonLinear Physics*, (Harwood Academic Publishers, New York, 1988)

[11] T. Katsouleas, Am. J. Phys. **61**, 663 (1993)

[12] T. Katsouleas and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **51**, 392 (1983)

[13] A. Fukuyama, H. Momota, R. Itatani and T.Takizuka, **38**, 701 (1977)

[14] D. Strickland and G. Morou, Opt. Commun. **56**, 216 (1985)

[15] J. T. Mendonça and L. Oliveira e Silva, Phys. Rev. E, Abril 1994

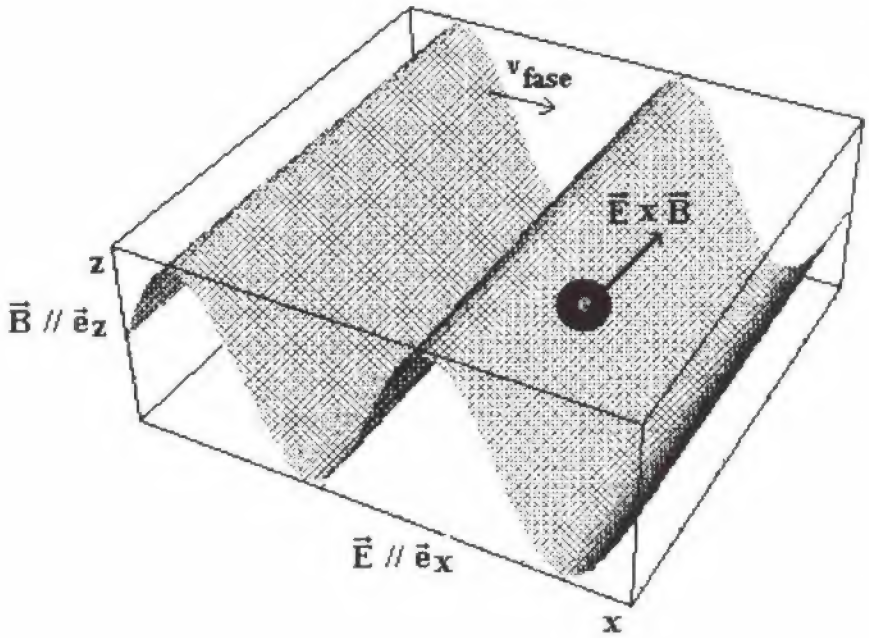


Figura 1 - Esquema conceptual do Surfatrão

Diagrama do Sistema CPA - Tera Watt de Lisboa

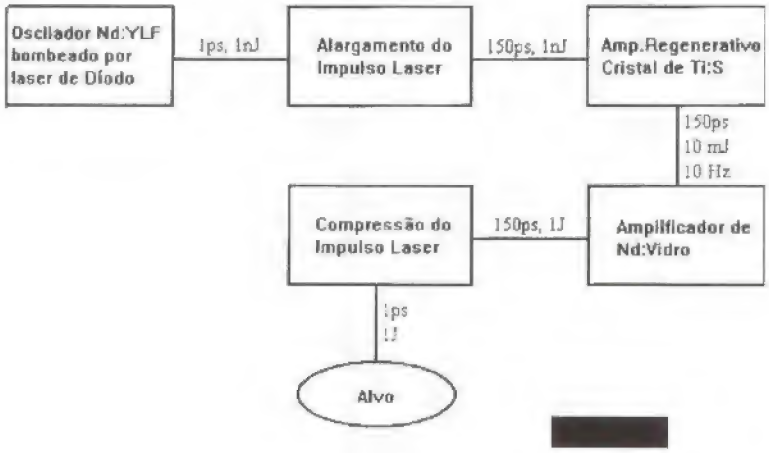


Figura 2 - Diagrama do sistema CPA-TeraWatt de Lisboa

TERMODINÂMICA PARA ENGENHARIA MECÂNICA: FINALIDADES E OBJECTIVOS

João Ventura
Secção de Termodinâmica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, UTL

RESUMO

As disciplinas Termodinâmica I e II, leccionadas respectivamente no 1.º e 2.º semestres do 3.º ano da licenciatura em Engenharia Mecânica, resultaram da disciplina Termodinâmica, anual, leccionada no mesmo 3.º ano até à reforma curricular que teve lugar no início da década de 70. Elas constituem, no seu conjunto, um espaço de aprendizagem onde os alunos tomam contacto com a Termodinâmica Macroscópica e as suas principais aplicações no domínio da Engenharia Mecânica. Note-se que os mesmos alunos já aprenderam Termodinâmica como uma das disciplinas leccionadas pelo Departamento de Física, que no entanto é tradicionalmente ensinada de um ponto de vista microscópico.

O presente artigo descreve o conteúdo programático daquelas disciplinas, e reflecte a experiência do autor como responsável e docente das mesmas durante vários anos no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico. Além do programa, que se justifica resumidamente, apresenta-se uma lista de finalidades e objectivos das disciplinas, e salientam-se algumas vantagens de um ensino orientado por objectivos.

Como os programas das duas disciplinas são fortemente interdependentes, quando não der lugar a ambiguidade, ou quando forem tratados pontos genéricos, referir-se-à apenas Termodinâmica.

ABSTRACT

Thermodynamics I and II are one-semester courses, followed by all Mechanical Engine-

1. INTRODUÇÃO

Os livros de texto de Termodinâmica para cursos de engenharia, de que as referências [1] a [7] constituem exemplos típicos, começam geralmente, após a exposição de alguns conceitos básicos, por enunciar a 1.ª lei da Termodinâmica aplicada a sistemas fechados, passando depois à apresentação da mesma lei para sistemas abertos.

A 2.ª lei surge posteriormente, e com frequência formulada em termos do funcionamento das máquinas térmicas (enunciados de Clausius e de Kelvin-Planck).

Verifica-se assim que os conceitos de sistema fechado e sistema aberto surgem separadamente, e de tal modo que problemas envolvendo um e outro tipo de sistemas tendem frequentemente a ser considerados pelos alunos como completamente distintos.

A referência [8] apresenta uma formulação que difere consideravelmente das anteriores, evitando os inconvenientes mencionados, e foi assim usada como modelo de parte da estrutura do programa que se expõe neste artigo.

Como o tema base da Termodinâmica é a energia e as trocas de energia, escolheu-se a noção de balanço como a noção central.

Introduzida em relação a uma variável extensiva genérica, apresentam-se em seguida alguns exemplos para mostrar que existem propriedades conservadas e não conservadas. Concretizando em relação à massa e à energia, são obtidas as respectivas equações de balanço aplicadas ao caso mais geral (sistema aberto em regime variável).

Fazendo as simplificações apropriadas nesta equação geral de balanço de energia, são deduzidas as equações da primeira lei para um sistema aberto em regime estacionário e para um sistema fechado. O sistema fechado surge assim como um caso particular do sistema aberto e não como algo totalmente distinto.

Outro aspecto que se salienta neste ponto é o facto de as equações de balanço de massa e energia (bem como a de entropia, introduzida mais tarde) serem apresentadas i) referidas a um intervalo de tempo e ii) numa base instantânea (em termos de taxas de variação, caudais e potências).

Esta segunda representação afasta-se um pouco da Termodinâmica Clássica, que apenas trata de estados de equilíbrio, onde o tempo não intervém como variável; no entanto, a sua utilidade nas aplicações justifica a sua inclusão, e o princípio do estado local serve de fundamento a essa inclusão.

A localização desta disciplina no curso justifica algumas considerações adicionais. O 3.º ano é aquele em que se pode dizer que os alunos têm o primeiro contacto com o Departamento de Engenharia Mecânica, visto a maior parte das disciplinas dos dois primeiros anos serem leccionadas pelos departamentos de Matemática e Física.

É assim uma disciplina que, além das suas finalidades específicas, deve realizar (embora não exclusivamente) as seguintes tarefas adicionais:

- ser um factor de motivação em relação ao mundo da engenharia. Com este fim, nalgumas aulas teóricas são projectados slides ou apresentadas transparências com instalações e equipamento diverso;
- ajudar a familiarizar o aluno com unidades, ordens de grandeza, valores típicos, através da resolução de problemas;
- contribuir para a introdução à prática do trabalho experimental, mediante a realização de ensaios laboratoriais;
- melhorar a sua capacidade de comunicação escrita, através da realização de relatórios dos ensaios laboratoriais e outros trabalhos, devolvidos após correcção.

2. PROGRAMA

Esta secção descreve de forma detalhada o conteúdo das duas disciplinas. Pode ver-se que no primeiro semestre se introduz a parte mais fundamental – capítulos 1 a 5 – não deixando de estabelecer a ponte para as aplicações – capítulos 6 a 13. No segundo semestre, o capítulo inicial é uma extensão de matéria já dada no primeiro, enquanto nos três restantes capítulos se tratam aplicações importantes para a engenharia mecânica.

TERMODINÂMICA I

Capítulo 1 Introdução

Conceitos básicos. Sistema. Vizinhança. Propriedades. Hipótese do contínuo. Estado. Fase. Equilíbrio. Energia. Trabalho. Calor. Estados de equilíbrio. Sua caracterização. Variáveis intensivas e extensivas. Equações de estado.

Estados de não equilíbrio. Princípio do estado local.

Capítulo 2 Conservação de Massa e Energia

Equações de balanço. Propriedades conservadas e não conservadas. Exemplos do quotidiano. Formulação em termos de um intervalo de tempo ou numa base instantânea. Equação de balanço para uma propriedade extensiva genérica. Metodologia e convenções.

Equação de balanço de massa. Conservação da massa. Casos particulares.

Equação de balanço de energia. Conservação de energia. Mecanismos de transferência de energia. Energia associada à massa entrada ou saída. Calor. Trabalho. Trabalho ao veio. Trabalho de expansão. Trabalho associado à transferência de massa. Entalpia. Trabalho eléctrico. Casos particulares.

Capítulo 3 Propriedades das Substâncias

Algumas propriedades adicionais. Energia de Helmholtz, energia de Gibbs, entropia. Variáveis naturais. Energia interna e propriedades derivadas em função das suas variáveis naturais. Mnemónica do quadrado. Relações de Maxwell. Equações de estado. Sua determinação. Coeficientes termodinâmicos: coeficientes de expansão e de compressibilidade e calores específicos. Relação entre os coeficientes. Jacobianos e derivadas parciais: método das áreas. Propriedades e exemplos de aplicação.

O modelo de gás perfeito. Equação dos gases perfeitos. Constante dos gases perfeitos. Algumas implicações deste modelo. Processos em gases perfeitos. Sua representação em diversos diagramas termodinâmicos.

Outras equações de estado. Equação de Van-der-Waals. Breve referência às equações de Bertholet, Beattie-Bridgeman, Dieterici, Benedict-Webb-Rubin, Redlich e Kwong. Equação de virial. Factor de compressibilidade. Lei dos estados correspondentes. Diagrama de compressibilidade generalizado. O mo-

ering 3rd year students. Considered together, they form a learning environment where students are exposed to Macroscopic Thermodynamics and its main applications in the field of Mechanical Engineering. The same students have already followed a Thermodynamics course given by the Physics Department, but this is usually taught from a microscopic point of view.
The present paper describes the course contents, and reflects the author's experience coordinating and teaching these courses in the Mechanical Engineering Department at Instituto Superior Técnico for several years. Besides the contents, which are briefly justified, a list of both courses aims and objectives is presented, and some advantages of an objective oriented approach are emphasized.

delo de líquido incompressível. Algumas implicações.

Mudança de fase. Gases e vapores. Terminologia. Vapor de água. Tabelas. Determinação das propriedades na zona a duas fases. Diagrama temperatura-entropia. Diagrama de Mollier.

Capítulo 4 Equação de Balanço de Entropia

Introdução. Processos naturais. Entropia. Equação de balanço de entropia. Geração de entropia. Casos particulares. Balanço de entropia e reversibilidade.

Reversibilidade e irreversibilidade em diversos processos. Trabalho fornecido e recebido. Rendimentos isentrópicos: turbinas, compressores, tubeiras e difusores. Trabalho ao veio reversível. Laminagem. Coeficiente de Joule-Thomson.

Capítulo 5 Estabilidade e Equilíbrio

Princípio do máximo de entropia e do mínimo de energia. Critérios de equilíbrio baseados em diferentes constrangimentos. Estabilidade intrínseca de sistemas de um só componente. Princípio de Le Chatelier. Energia de Gibbs. Superfície g,P,T, superfície P,v,T e diagramas P,T. A água como substância anómala: algumas consequências.

Estados metaestáveis. Analogias. Equação de Clapeyron. Caso particular da transição líquido-vapor. Mudança de fase em sistemas com mais de um componente. Regra das fases de Gibbs.

Capítulo 6 Ciclos Termodinâmicos

Motores térmicos. Calor e trabalho trocados. Ciclo de Carnot. Rendimento. Enunciado de Kelvin-Planck da 2.ª lei.

Máquinas frigoríficas. Frigoríficos e bombas de calor. Enunciado de Clausius da 2.ª lei.

Máquinas de combustão interna. Aplicação da análise feita para as máquinas térmicas às máquinas de combustão interna.

Capítulo 7 Ciclo de Turbina de Gás

Introdução.Instalações em circuito fechado e circuito aberto: vantagens e desvantagens.

Análise do ciclo simples. Rendimento e trabalho útil do ciclo ideal. Sua variação com a razão de pressões. Efeito das irreversibilidades. Turbina de gás com regenerador. Regenerador ideal e não ideal: eficiência do regenerador. Estudos paramétricos: exemplos.

Principais características das centrais de turbina de gás existentes em Portugal.

Capítulo 8 Ciclos de Vapor de Produção de Potência Mecânica

Introdução. Distinção entre o ciclo de vapor e o ciclo de gás. Esquema básico de uma central térmica. Limitações ao valor do rendimento. Parâmetros de caracterização dos ciclos de vapor. Rendimentos do ciclo ideal e do ciclo real. Razão de rendimentos. Razão de trabalhos. Consumo específico de vapor e consumo específico de combustível. Ciclo de Carnot. Rendimento. Ciclo de Rankine. Ciclo de Rankine com sobreaquecimento e reaquecimento. Características do fluido ideal para ciclos de vapor.

Centrais a vapor existentes em Portugal. Características principais.

Capítulo 9 Ciclos Frigoríficos

Introdução. Ciclo de Carnot inverso: frigorífico e bomba de calor. Eficiências. Efeito refrigerante. Ciclo frigorífico de Carnot para um fluido condensável. Ciclo de compressão de vapor. Diagrama P,h. Consequências do funcionamento irreversível do compressor. Tabelas de fluidos frigorigéneos. Propriedades desejáveis para estes fluidos.

Capítulo 10 Outros Ciclos

Ciclos combinados: razões para a sua utilização. Ciclo combinado mercúrio-vapor de água. Ciclo combinado gás-vapor. Motores de combustão interna. Ciclos de ar padrão. Ciclos de Otto, Diesel e misto. Defi-

nições e rendimentos. Diagramas P,v para motores reais. Ciclo de Stirling: ciclo ideal e realização prática.

Capítulo 11 Cogeração

Introdução. Definição. Vantagens da cogeração. Turbina de contrapressão. Turbina de extracção-condensação. Unidades de pequena potência: o TOTEM – características principais.

Capítulo 12 Recuperação de Energia

Análise do uso da energia. Pontos principais a considerar. Energia perdida. Origens possíveis dessas perdas. Análise custo-benefício. Perdas de energia. Qualidade e quantidade. Sistemas de recuperação de calor. Métodos de recuperação.

Capítulo 13 Auditorias de Energia

Esquema geral da auditoria. Registos de consumo. Manutenção. Pessoal. Investimentos. Diferentes formas de apresentar a análise energética. Histogramas. Diagramas circulares. Diagrama de Sankey.

TERMODINÂMICA II

Capítulo 1 Ciclos Avançados

Ciclo de turbina de gás. Reaquecimento. Arrefecimento intermédio. Influência no trabalho útil. Sua utilização em conjunto com regeneração. Optimização do rendimento.

Ciclos de vapor. Ciclos com regeneração. Subtiragens de vapor. Pré-aquecedores abertos e fechados. Economizador e pré-aquecedor de ar. Ciclos de vapor em centrais nucleares.

Ciclos frigoríficos. Compressão em dois andares; tanque de flash. Ciclos de compressão de vapor em cascata. Aplicações. Liquefacção de gases: processo de Linde. Ciclo frigorífico de gás. refrigerador a água. Frigorífico de absorção.

Breve referência ao funcionamento de instalações a carga parcial. Curvas de funcionamento de alguns componentes. Consequências do funcionamento da instalação em condições diferentes da carga nominal. Exemplos.

Capítulo 2 Misturas Gasosas Ideais. Psicrometria

Misturas e misturas ideais. Composição de uma mistura. Fracções mássica e molar. Leis de Dalton e Amagat-Leduc. Misturas de gases perfeitos. O ar húmido. Humidade específica, humidade relativa e ponto de orvalho. Entalpia do ar húmido. Temperatura húmida e seca. Diagrama psicrométrico.

Processos com ar húmido. Aquecimento, arrefecimento, humidificação, desumidificação, mistura de caudais. Balanços mássicos e energético. Equipamentos. Factor de contacto. Condicionamento de ar. Conforto térmico. Torres de arrefecimento.

Capítulo 3 Introdução à Combustão

Importância da combustão. Combustíveis: sua caracterização. Breves noções sobre a tecnologia de queima.

Reacções químicas. Estequiometria. Equações químicas. Análise dos produtos da combustão.

Análise energética da combustão. Combustão a volume constante e a pressão constante. Entalpia de combustão e de formação. Poder calorífico. Temperatura de combustão adiabática: seu cálculo.

Equilíbrio. Constante de equilíbrio. Princípio de Le Chatelier. Dissociação. Composição de equilíbrio de uma mistura com dissociação. Temperatura de combustão adiabática quando ocorre dissociação.

Capítulo 4 Exergia

Introdução. Conceito de exergia. Ambiente, equilíbrio, estado morto. Exergia associada à transferência de energia sob a forma de trabalho, de calor e a um escoamento em regime estacionário. Componentes da exergia: cinética, potencial, física e química.

Análise exergética de sistemas fechados. Exergia estática. Equação de balanço de exergia. Casos particulares. Aplicação da equação de balanço de exergia a sistemas abertos em regime estacionário. Taxa de irreversibilidade. Rendimento exergético. Representação gráfica do balanço de exergia.

Exergia química. Substâncias de referência. Exergia química de uma mistura. Análise exergética de processos simples. Expansão, laminagem, compressão, combustão. Formas de diminuir a irreversibilidade. Exergia química de combustíveis industriais.

3. FINALIDADES E OBJECTIVOS

O ensino orientado por objectivos é tratado de forma exaustiva em Bloom [9]. A ideia central do método é que qualquer programa de instrução tem como finalidade ajudar os estudantes a mudar o seu comportamento; após a instrução, o estudante deve ser capaz de fazer alguma coisa que antes não era capaz.

Uma vez que os objectivos sejam definidos claramente, podem tornar-se modelos ou planos que ajudam a formar e a guiar os processos de instrução e avaliação.

A descrição dos objectivos deve ser feita em termos operacionais, e as palavras usadas não devem ser do tipo *conhecer / compreender / possuir espírito crítico / apreciar... que se caracterizam por uma certa imprecisão e são aptidões que não é possível medir, mas sim do tipo declarar / dizer pelas próprias palavras / calcular / definir...*

A presente secção expõe as finalidades e objectivos das disciplinas. As finalidades indicam as principais linhas de força da disciplina, de uma forma necessariamente condensada. Os objectivos enunciam capacidades que se pretende que o aluno possua após o estudo de cada ponto da matéria; são assim formulados com o máximo pormenor e sempre em termos de um comportamento que o aluno deve mostrar.

A lista apresentada pode ter duas utilizações:

- pode servir ao aluno para uma auto-avaliação antes de comparecer a um exame;
- pode ser um auxiliar na normalização das classificações: a partir dela é possível seleccionar um *subconjunto de objectivos que constitua o mínimo exigível para aprovação na disciplina.*

Se cada disciplina leccionada no IST fizesse este trabalho, e garantisse que cada aluno passado tinha satisfeito os objectivos mínimos, tornando ao mesmo tempo conhecidos esses objectivos mínimos às disciplinas a juzante, o problema das precedências seria desdramatizado e poderia ser discutido numa base racional e objectiva.

Finalidades

Familiarizar o aluno com os conceitos de energia e de entropia e as formas como estas grandezas podem ser transferidas e armazenadas;

Torná-lo capaz de aplicar com facilidade o formalismo termodinâmico, bem como de utilizar a informação sobre propriedades termodinâmicas (tabelas ou diagramas).

Formular e aplicar balanços de massa, de energia e de entropia.

Apresentar exemplos diversos de sistemas termodinâmicos, fornecendo uma metodologia geral de análise que permita ao aluno o estudo de qualquer processo ou sistema termodinâmico.

Introduzir o conceito de exergia, formular a equação de balanço de exergia e aplicá-la na análise de sistemas energéticos.

Objectivos

Por uma questão de sistematização, os objectivos que se seguem foram distribuidos pelos dois semestres lectivos e, dentro de cada um, pelos capítulos em que está dividida a matéria. Assim, depois de

estudar cada capítulo, o aluno deve ser capaz de:

TERMODINÂMICA I

Capítulo 1 Introdução

Definir sistema, vizinhança, propriedade, estado e fase.

Caracterizar o estado de equilíbrio de um sistema termodinâmico.

Definir variável intensiva e extensiva e apresentar exemplos.

Definir variável de estado e equação de estado. Exemplificar.

Enunciar o princípio do estado local e justificar a sua importância.

Capítulo 2 Conservação de Massa e Energia

Formular uma equação de balanço de uma propriedade extensiva genérica, quer em termos da variação instantânea quer da variação num intervalo de tempo finito, e caracterizar os diversos termos da equação.

Distinguir entre propriedade conservada e propriedade não conservada. Dar exemplos.

Reconhecer a diferença entre a equação de balanço de uma e outra.

Escrever a equação de balanço de massa para um sistema aberto em regime não estacionário.

Simplificar a equação para tratar o caso de regime estacionário e sistema fechado.

Reconhecer as componentes da energia total de um sistema termodinâmico (interna, cinética e potencial).

Descrever os diversos mecanismos de transferência de energia entre um sistema e a sua vizinhança: fluxo de energia associado a um fluxo de massa, calor, trabalho (trabalho ao veio, trabalho de expansão, trabalho associado à transferência de massa, trabalho eléctrico).

Escrever a equação de balanço de energia para o caso geral de um sistema aberto em regime não estacionário e identificar todos os termos.

Simplificar a equação para tratar o caso de sistema adiabático, sistema aberto em regime estacionário e sistema fechado.

Capítulo 3 Propriedades das Substâncias

Caracterizar uma variável natural; exprimir as diferenciais da energia interna U, entalpia H, energia de Helmholtz F e energia de Gibbs G em função das diferenciais das suas variáveis naturais.

Obter as relações de Maxwell a partir das expressões do ponto anterior.

Utilizar a mnemónica do quadrado para obter as expressões dos dois pontos anteriores.

Definir os coeficientes de expansão isobárica e de compressibilidade isotérmica, e os calores específicos a pressão e a volume constante; dada a equação que relaciona estes quatro coeficientes, verificar que se trata de uma identidade.

Interpretar o jacobiano de uma transformação entre dois espaços bi-dimensionais como um quociente de áreas elementares; utilizar o método das áreas para exprimir uma derivada parcial em que intervenham quaisquer três propriedades em função dos coeficientes termodinâmicos.

Exprimir as variações de energia interna e entalpia dU e dH em função das variações de quaisquer duas das três variáveis P, V e T.

Escrever a equação dos gases perfeitos (em termos molares ou mássicos e com o volume total ou volume específico) e utilizá-la.

Obter a constante dos gases perfeitos R para qualquer gás a partir da massa molar e da constante universal R0 e conhecer o valor desta.

Definir processos isócoro, isobárico, adiabático, isotérmico e representá-los nos diagramas P,T; P,v e T,v.

Mostrar que a energia interna e a entalpia de um gás perfeito são apenas função da temperatura.

Determinar a variação da entropia de um gás perfeito em função das variações de quaisquer duas das variáveis P,v e T.

Escrever as equações de uma adiabática e de uma politrópica e conhecer as condições de aplicação.

Resolver problemas envolvendo processos simples com gases perfeitos.

Escrever a equação de Van der Waals, identificar o que a distingue da equação dos gases perfeitos e inferir a forma das isotérmicas num diagrama P,v.

Definir factor de compressibilidade e enunciar a lei dos estados correspondentes.

Caracterizar o modelo de líquido incompressível. Obter expressões para a variação de energia interna e entalpia de um líquido incompressível.

Caracterizar uma mudança de fase (sólido-líquido, líquido-vapor, sólido--vapor) e definir gás e vapor.

Estar familiarizado com a terminologia da mudança de fase.

Definir calor latente, pressão de saturação, temperatura de saturação e grau de sobreaquecimento.

Usar com facilidade as tabelas de vapor de água e de fluidos frigorigéneos.

Definir título do vapor e usá-lo para calcular propriedades na zona a duas fases.

Esboçar nos diagramas T,s e h,s as isolinhas mais importantes para um fluido condensável.

Capítulo 4 Equação de Balanço de Entropia

Definir entropia e escrever a sua equação de balanço, em termos instantâneos e para um intervalo de tempo finito, e identificar todos os termos.

Definir processo reversível e identificar as condições em que um processo pode ser considerado como tal.

Mostrar que o trabalho produzido por um sistema é máximo para um processo reversível.

Mostrar que o trabalho recebido por um sistema é mínimo para um processo reversível.

Definir rendimento isentrópico de uma turbina e de um compressor (ou bomba); mostrar o significado deste parâmetro para aferir o comportamento de um sistema real.

Caracterizar uma tubeira e um difusor e explicar a sua utilidade. Aplicar-lhes as equações de balanço mássico e energético; definir os respectivos rendimentos isentrópicos e mostrar o seu significado.

Definir laminagem de um fluido e aplicar a uma válvula de laminagem a equação de balanço de energia. Esboçar as isentálpicas e a curva de inversão num diagrama P,T; definir o coeficiente de Joule-Thomson e mostrar a sua utilidade.

Capítulo 5 Estabilidade e Equilíbrio

Enunciar o princípio do máximo de entropia e o princípio do mínimo de energia.

Deduzir a condição de equilíbrio para um sistema fechado com T e V constantes e com T e P constantes.

Mostrar que o critério de estabilidade para um sistema de um só componente é expresso por

$$C_{v>0} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T < 0$$

Enunciar o princípio de Le Chatelier e dar exemplos da sua aplicação.

Esboçar as linhas de coexistência de fases no diagrama P,T; distinguir o caso da água do da generalidade das substâncias. Enunciar consequências do comportamento anómalo da água.

Definir Estado Metaestável e Exemplificar Situações em Que Tais Estados Podem Ocorrer.

Deduzir a equação de Clapeyron; aplicá-la à transição líquido-vapor para obter uma expressão aproximada da pressão do vapor em função da temperatura.

Enunciar a regra das fases de Gibbs e exemplificar a sua aplicação.

Capítulo 6 Ciclos Termodinâmicos

Definir ciclo. Calcular o trabalho e o calor postos em jogo num ciclo e mostrar a sua correspondência com

as áreas limitadas pelos ciclos nos diagramas P,v e T,s.

Definir motor térmico; definir fonte quente e fonte fria e dar exemplos de concretização destes dois conceitos.

Definir ciclo de Carnot, explicar a sua utilidade, representá-lo nos diagramas P,v, T,s e T,v.

Definir rendimento e exprimi-lo em termos das temperaturas da fonte quente e fonte fria, para um motor reversível e tendo em conta as irreversibilidades.

Conhecer o enunciado de Kelvin-Planck da 2.ª lei da Termodinâmica e demonstrá-lo a partir da equação de balanço de entropia.

Definir máquina frigorífica; distinguir entre frigorífico e bomba de calor; definir eficiência em ambos os casos.

Conhecer o enunciado de Clausius da 2.ª lei e demonstrá-lo a partir da equação de balanço de entropia. Provar a equivalência dos enunciados de Clausius e de Kelvin-Planck.

Listar as hipóteses simplificativas que permitem analisar máquinas de combustão interna como motores térmicos.

Capítulo 7 Ciclo de Turbina de Gás

Desenhar esquematicamente uma instalação de turbina de gás tanto em circuito aberto como em circuito fechado, identificando os componentes principais. Reconhecer vantagens e desvantagens de um e outro tipo de instalação.

Representar o ciclo nos diagramas h,s; T,s e P,v.

Obter a expressão do rendimento do ciclo ideal em função da razão de pressões.

Obter uma expressão para o trabalho útil do ciclo e identificar o valor da razão de pressões para o qual o trabalho útil é máximo.

Indicar as principais consequências do funcionamento irreversível de um compressor ou turbina.

Obter expressões para o rendimento e para o trabalho útil no caso do ciclo irreversível; identificar as diferenças em relação ao ciclo reversível.

Explicar a função do regenerador numa instalação de turbina de gás e conhecer as condições de utilização. Definir eficiência do regenerador e mostrar a influência do seu valor no rendimento do ciclo com regeneração.

Resolver problemas numéricos usando a teoria dos pontos anteriores.

Capítulo 8 Ciclos de Vapor de Produção de Potência Mecânica

Distinguir entre ciclo de gás e ciclo de vapor.

Definir os seguintes parâmetros utilizados na caracterização dos ciclos de vapor: rendimento do ciclo ideal, rendimento do ciclo real, razão de rendimentos, razão de trabalhos, consumo específico de vapor e consumo específico (de combustível) da central.

Caracterizar o ciclo de Carnot funcionando com um fluido condensável e explicar porque não é possível de realizar na prática.

Caracterizar o ciclo de Rankine e mostrar as suas vantagens em relação ao ciclo de Carnot funcionando entre as mesmas temperaturas.

Definir sobreaquecimento e reaquecimento e indicar as respectivas vantagens.

Resolver problemas numéricos utilizando as tabelas de vapor de água.

Capítulo 9 Ciclos Frigoríficos

Descrever o funcionamento de um frigorífico e de uma bomba de calor baseados no ciclo frigorífico de Carnot; definir e obter expressões para as respectivas eficiências. Definir efeito frigorífico.

Descrever um ciclo frigorífico de Carnot para um fluido condensável e representá-lo no diagrama T,s. Enunciar as principais razões pelas quais este ciclo não é usado.

Descrever o ciclo de compressão de vapor, representá-lo no diagrama T,s e saber as diferenças entre este ciclo e o ciclo frigorífico de Carnot.

Esboçar um diagrama P,h com a localização das principais isolinhas e

representar neste diagrama um ciclo de compressão de vapor.

Resolver problemas de ciclos frigoríficos usando as tabelas ou diagramas.

Capítulo 10 Outros Ciclos

Indicar a principal vantagem da utilização de ciclos combinados. Descrever as principais vantagens e inconvenientes do ciclo combinado mercúrio/vapor de água. Descrever as características principais de uma instalação combinada turbina de gás/turbina de vapor.

Descrever os ciclos de ar padrão Otto, Diesel e misto e obter expressões para os respectivos rendimentos.

Esboçar o diagrama P,v de um motor a gasolina e de um motor Diesel; indicar as diferenças em relação aos ciclos de ar padrão correspondentes.

Descrever o ciclo de Stirling; representá-lo no diagrama P,v; referir os principais problemas que se colocam à sua realização prática.

Capítulo 11 Cogeração

Definir cogeração, explicar o seu interesse e apresentar casos em que se justifique o seu uso.

Descrever algumas instalações de cogeração, tanto de média/alta potência como de pequena potência.

Capítulo 12 Recuperação de Energia

Identificar diversas formas como, num processo ou instalação industrial, a energia pode ser perdida.

Descrever os métodos de recuperação de calor mais utilizados.

Capítulo 13 Auditorias de Energia

Saber em que consiste uma auditoria de energia, qual a sua finalidade, quais os principais passos que a constituem.

Conhecer as diversas formas de apresentar os resultados de uma análise energética.

TERMODINÂMICA II

Capítulo 1 Ciclos Avançados

Ciclo de turbina de gás

Caracterizar o reaquecimento e mostrar o seu interesse; explicar a sua exequibilidade e os seus limites em instalações de circuito aberto. Caracterizar a compressão com arrefecimento intermédio. Calcular a pressão intermédia que maximiza o trabalho útil. Mostrar o interesse de usar estas duas modificações em conjunto com a regeneração.

Resolver problemas numéricos de aplicação da teoria do ponto anterior.

Ciclos de vapor

Descrever a regeneração e explicar as suas vantagens. Discutir as consequências das subtiragens de vapor. Explicar como se faz na prática a regeneração, distinguindo entre pré-aquecedores abertos e fechados e as implicações da utilização de uns ou outros. Resolver problemas de ciclos de vapor, incluindo sobreaquecimento, reaquecimento e regeneração.

Explicar a função do economizador e do pré-aquecedor de ar numa central térmica.

Ciclos frigoríficos

Descrever e representar esquematicamente um ciclo frigorífico com compressão em dois andares e utilização de um tanque de flash; idem para uma instalação frigorífica com ciclos de compressão de vapor em cascata. Resolver problemas numéricos em instalações deste tipo utilizando as tabelas de fluidos frigorigéneos.

Descrever o processo de Linde de liquefacção de gases.

Descrever o ciclo frigorífico de gás e listar as suas vantagens e inconvenientes quando comparado com o ciclo de compressão de vapor.

Descrever o ciclo frigorífico a água (utilizando uma bomba de ejector)

Explicar o princípio de funcionamento e descrever sucintamente um frigorífico de absorção.

Funcionamento a carga parcial

Explicar a diferença entre o funcionamento de uma instalação à carga nominal e a carga parcial, com recurso a curvas de funcionamento dos vários componentes.

Capítulo 2 Misturas Gasosas Ideais. Psicrometria

Definir mistura e mistura ideal.

Definir fracção mássica, fracção molar e fracção volumétrica.

Enunciar as leis de Dalton e Amagat-Leduc e dar o seu significado físico.

Passar de fracções mássicas a fracções molares e inversamente.

Mostrar que o vapor de água contido no ar pode ser considerado um gás perfeito.

Definir humidade específica, humidade relativa e ponto de orvalho.

Derivar a expressão que dá a entalpia do ar húmido em função das entalpias específicas do ar seco e vapor de água e da humidade específica.

Definir temperatura húmida e temperatura seca.

Descrever um termómetro de bolbo húmido, seu princípio de funcionamento e diferença em relação ao termómetro de bolbo seco.

Esboçar um diagrama psicrométrico, incluindo nele isolinhas de humidade relativa, temperatura seca, temperatura húmida e volume específico.

Em relação aos seguintes processos com ar húmido

a) aquecimento

b) arrefecimento

c) humidificação

d) desumidificação

e) mistura de caudais

descrever os processos e representá-los no diagrama psicrométrico;

efectuar os balanços mássicos e energético a um volume de controlo onde o processo tem lugar;

descrever os equipamentos onde os processos tem lugar, em particular baterias de aquecimento e arrefecimento e lavadores de ar, com e sem temperatura controlada.

Definir factor de contacto e conhecer valores típicos deste parâmetro.

Calcular as características do caudal de ar húmido resultante da mistura de dois caudais dados.

Descrever em que consiste o condicionamento de ar e quais as propriedades do ar que interessa controlar.

Justificar a necessidade do condicionamento de ar em termos do balanço energético de um organismo vivo; definir e caracterizar conforto térmico.

Descrever todos os componentes de um condicionador de ar para poder efectuar todas as operações que eventualmente sejam necessárias (com tempo quente ou frio).

Descrever uma torre de arrefecimento, explicar o seu funcionamento e utilidade.

Capítulo 3 Introdução à Combustão

Definir combustão , fogo e chama.

Dar exemplos de sistemas e processos em que a combustão seja essencial.

Caracterizar o ar atmosférico através das proporções dos seus principais constituintes.

Dar exemplos de combustíveis sólidos.

Definir análise elementar e análise imediata de um carvão .

Dar exemplos de combustíveis líquidos.

Caracterizar os combustíveis líquidos mais correntes através do hidrocarboneto predominante.

Dar exemplos de combustíveis gasosos.

Caracterizar a diferença entre chamas de pré-mistura e chamas de difusão , incluindo os aspectos ligados à segurança.

Indicar os principais problemas associados à queima dos combustíveis líquidos, referindo a importância da atomização do combustível.

Descrever as diversas formas de queimar combustível sólido, refe-

rindo nomeadamente a combustão em grelha, sob a forma de combustível pulverizado e em leito fluidizado.

Definir estequiometria, reagentes e produtos de uma reacção.

Definir equação química.

Escrever as equações químicas da combustão dos combustíveis mais correntes, com oxigénio e ar, numa base molar e mássica.

Definir ar estequiométrico ou teórico, excesso de ar, mistura pobre, mistura rica, razão de equivalência, riqueza da mistura, combustão neutra, oxidante e redutora.

Indicar a ordem de grandeza do excesso de ar para os processos de combustão mais correntes.

Definir análise húmida e seca dos produtos da combustão.

Escrever a equação de balanço energético para um sistema fechado a volume constante, sistema aberto a pressão constante e sistema fechado a pressão constante, dentro dos quais tem lugar uma reacção de combustão. Particularizar para os casos extremos em que: 1) o processo é adiabático; 2) a temperatura final dos produtos da combustão é igual à temperatura inicial dos reagentes e representá-los, bem como um caso intermédio, num diagrama energia-temperatura.

Definir temperatura de combustão adiabática.

Definir entalpia (energia interna) de combustão e entalpia (energia interna) de combustão padrão.

Dada a entalpia (energia interna) de combustão padrão, calcular a entalpia (energia interna) de combustão a qualquer outra temperatura.

Definir entalpia de formação e entalpia de formação padrão.

Definir poder calorífico de um combustível; distinguir entre poder calorífico a pressão constante e a volume constante e entre poder calorífico superior e inferior.

Calcular a temperatura de combustão adiabática, usando 1) tabela de calores específicos em função da temperatura; 2) tabela de entalpias em função da temperatura.

Definir constante de equilíbrio; exprimi-la em termos de pressões parciais e fracções molares e relacionar entre si estas duas expressões.

Enunciar o princípio de Le Chatelier; utilizá-lo para explicar a influência no equilíbrio de 1) variação da concentração de um dos constituintes; 2) variação do volume total (ou pressão total) do sistema; 3) variação da temperatura do sistema.

Definir dissociação e descrever qual o seu efeito em combustão .

Calcular a composição de uma mistura de produtos típicos de uma reacção de combustão, dada a temperatura e uma tabela de constantes de equilíbrio.

Calcular a temperatura de combustão adiabática, considerando a dissociação dos produtos.

Capítulo 4 Exergia

Caracterizar exergia em relação a energia. Definir ambiente, equilíbrio restrito com o ambiente, estado morto.

Definir a exergia associada ao trabalho, ao calor e a um escoamento. Identificar no último caso as parcelas cinética, potencial, física e química da exergia.

Mostrar que a exergia física tem uma componente térmica e uma componente de pressão.

Escrever a expressão da exergia contida num sistema fechado.

Escrever a equação de balanço de exergia aplicada a um sistema aberto em regime não estacionário, identificar todos os termos e aplicá-la a problemas concretos.

Calcular a taxa de irreversibilidade em processos simples.

Definir rendimento exergético e calcular o seu valor para uma dada instalação. Explicar o que o distingue do rendimento energético.

Conhecer e aplicar os diversos métodos de representação gráfica do balanço de exergia.

Definir exergia química, identificar as substâncias de referência, calcular a exergia química de uma mistura.

Efectuar balanços de exergia a diversos equipamentos, nomeadamente onde ocorram processos de expansão, compressão, laminagem ou de combustão.

Identificar formas de diminuir a irreversibilidade dos processos.

Calcular a exergia química de combustíveis industriais.

4. JUSTIFICAÇÃO DO CONTEÚDO

Na presente secção incluem-se alguns comentários sobre o conteúdo do programa. As razões da inclusão de um determinado assunto derivam ou da coerência interna do programa, ou de uma necessidade (detectada ou antecipada) na prática profissional de um engenheiro mecânico.

TERMODINÂMICA I

O Capítulo 1 destina-se à introdução de alguns conceitos básicos e de um conjunto de termos que vão constituir o vocabulário da disciplina. Esta introdução é relativamente rápida, uma vez que se presume que os conceitos são já conhecidos da disciplina Termodinâmica do 2.º ano (embora se verifique que, mais vezes do que seria de desejar, isso não acontece). Caracterizam-se os estados de equilíbrio dos sistemas termodinâmicos, apresenta-se o conceito de equação de estado e através da introdução do princípio do estado local, justifica-se a aplicação das relações de equilíbrio a estados de não equilíbrio, sendo apontados os limites desta aproximação.

O Capítulo 2 introduz a noção de balanço. Apresentadas algumas aplicações com exemplos do quotidiano, mostra-se a diferença entre propriedades conservadas e não conservadas e formula-se a equação de balanço para uma propriedade extensiva genérica. Esta equação é em seguida concretizada para a massa e energia, definindo cuidadosamente os diversos termos que entram nestas equações de balanço. Estas equações são sempre apresentadas na sua forma mais geral – aplicadas a um sistema aberto em regime não estacionário – sendo depois, mediante simplificação de certos termos, deduzidos diversos casos particulares de maior interesse, nomeadamente o sistema aberto em regime estacionário e o sistema fechado. Conforme se mencionou na Introdução, as equações de balanço são também apresentadas em duas versões: referidas a um intervalo de tempo e numa base instantânea.

Com a finalidade de permitir quantificar os problemas a resolver, o Capítulo 3 apresenta a metodologia que permite relacionar as propriedades termodinâmicas entre si, introduz os coeficientes termodinâmicos e apresenta os casos mais típicos de equação de estado: a equação dos gases perfeitos (que permite resolver problemas em que o ar e os chamados gases permanentes são os fluidos de trabalho) e equações de estado expressas por tabelas ou diagramas (discute-se a fenomenologia da mudança de fase, concretizando para os casos do vapor de água e fluidos refrigerantes). Chama-se a atenção para as limitações do modelo de gás perfeito, referindo as equações de estado para gases não perfeitos, mas dando uma atenção especial à equação de Van der Waals, tanto pela sua simplicidade como por servir de ponte para o fenómeno de mudança de fase. Refere-se também neste contexto o factor de compressibilidade e a lei dos estados correspondentes. É ainda apresentado o modelo de líquido incompressível.

O Capítulo 4 define entropia e apresenta a sua equação de balanço; o conceito de processo reversível surge neste capítulo como o caso limite para o qual a geração de entropia é igual a zero. Associa-se a reversibilidade ao máximo (mínimo) do trabalho fornecido (recebido) por um sistema que evolui entre condi-

ções dadas. Descrevem-se os processos que ocorrem em turbinas, compressores, tubeiras, difusores e válvulas de laminagem, introduzindo-se o conceito de rendimento isentrópico. Deduz-se também a expressão para o trabalho ao veio reversível num sistema aberto em regime estacionário.

O Capítulo 5 trata com mais profundidade o conceito de equilíbrio, já introduzido no capítulo 1, bem como a noção de estabilidade de um sistema. Discute-se a estabilidade intrínseca de sistemas de um só componente, chamando-se a atenção para o comportamento anómalo da água. A mudança de fase é apresentada como o exemplo de uma forma que um sistema tem de "fugir" à instabilidade. Estuda-se particularmente a transição líquido-vapor, de maior interesse em engenharia mecânica. O capítulo termina com a apresentação da regra das fases de Gibbs.

Uma aplicação muito importante da Termodinâmica em engenharia mecânica são as máquinas de funcionamento cíclico. Os capítulos seguintes dedicam-se a este aspecto. O conceito de ciclo termodinâmico é apresentado no Capítulo 6 como o processo que ocorre num sistema que passa por uma sucessão de estados, regressando ao estado inicial, enquanto troca calor com duas fontes (reservatórios de energia térmica) a temperaturas diferentes. Este nível de generalidade permite definir máquina motriz e máquina frigorífica. Faz-se a distinção entre máquina térmica como definida acima e máquina de combustão interna, e apresentam-se as aproximações usuais para analisar estas com a metodologia desenvolvida para a análise dos ciclos.

Após esta introdução genérica aos ciclos, os capítulos 7 a 10 apresentam diversos tipos particulares de ciclo termodinâmico: o ciclo de turbina de gás (Capítulo 7), o ciclo de vapor de produção de potência mecânica (Capítulo 8) e o ciclo frigorífico (Capítulo 9) são tratados a um nível relativamente elementar, e serão de novo abordados em Termodinâmica II. São ainda dados, de uma forma mais qualitativa, alguns exemplos de ciclos combinados (mercúrio/vapor de água e gás/ /água), os ciclos Otto, Diesel e misto e o ciclo de Stirling (Capítulo 10). Deste último será feita uma demonstração na aula teórica, enquanto os ciclos de turbina de gás, vapor e frigorífico serão objecto de ensaios laboratoriais.

O Capítulo 11 é uma última aplicação de ciclos termodinâmicos: tratando de cogeração, nele se descrevem unidades de média potência (instalações de vapor) e de pequena potência, baseadas no motor de automóvel. Os capítulos 12 e 13 tratam de aspectos concretos de utilização da análise energética. No Capítulo 12, são listadas diversas origens do desperdício de energia e descritos vários métodos de recuperação de calor. Esta problemática é retomada de forma mais geral no Capítulo 13, onde se descrevem com certo pormenor os diversos passos que constituem uma auditoria de energia.

TERMODINÂMICA II

O Capítulo 1 é a continuação dos capítulos 7, 8 e 9 do semestre anterior. São estudados de forma mais detalhada os ciclos já aí apresentados, referem-se alguns aspectos tecnológicos das instalações e é feita uma breve referência ao funcionamento de instalações a carga parcial.

Um sector industrial muito ligado à termodinâmica aplicada é o ar condicionado. Assim, o Capítulo 2 apresenta a teoria das misturas ideais e aplica essa teoria às misturas de ar e vapor de água – o ar húmido. É definida a terminologia apropriada e apresentado o diagrama psicrométrico. Numa segunda parte, são dados diversos processos com ar húmido, e os equipamentos onde ocorrem, aos quais são feitos balanços mássicos e energéticos. O condicionamento de ar é a aplicação final deste capítulo.

A combustão é um fenómeno importante que a maioria dos engenheiros mecânicos virá a encontrar.

Assim, para a totalidade dos alunos o Capítulo 3 constitui uma introdução à combustão. Começa por fornecer alguma informação sobre combustíveis e sobre a respectiva tecnologia de queima. Relembram-se algumas noções sobre reacções químicas e apresenta-se a análise energética da combustão, conduzindo ao cálculo da temperatura de combustão adiabática. Finalmente considera-se o equilíbrio químico, as reacções de dissociação, e chega-se ao cálculo da temperatura de combustão adiabática considerando a dissociação dos produtos da combustão.

A análise exergética (na terminologia anglo-saxónica *exergy analysis, second law analysis, ou availability analysis)* é um método de análise que tem vindo a aumentar o seu campo de aplicação. As suas aplicações vão da simples análise de sistemas energéticos, passando pelo estudo termo-económico de sistemas e processos até ao planeamento energético regional. O Capítulo 4 introduz o estudo dos sistemas energéticos em termos de exergia. Caracteriza a transferência de exergia associada ao trabalho e ao calor e a exergia associada a um escoamento. Define as componentes cinética, potencial, física e química da exergia de um escoamento. Apresenta os processos irreversíveis como correspondendo a uma perda (destruição) de exergia. Formula a equação de balanço de exergia e introduz o rendimento exergético de um sistema. Termina com alguns exemplos de aplicação da análise exergética a diversos processos e sistemas.

5. REFERÊNCIAS E OUTROS TEXTOS DE APOIO

[1] Reynolds, W. C. e Perkins, H. C., Engineering Thermodynamics, 2.ª ed., McGraw-Hill, 1977.

[2] Van Wylen, G. J. e R. E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics, 2.ª ed., John Wiley and Sons, 1978.*

[3] Holman, J. P., *Thermodynamics, 3.ª. ed., McGraw-Hill, 1980.*

[4] Wark, K., *Thermodynamics, McGraw-Hill, 1977.*

[5] Rogers, G. F. C. e Mayhew, Y. R., *Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer, 2.ª ed., Longman, 1967.*

[6] Moran, M.J. e H.N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley and Sons, 1988.*

[7] Howell, J.R. e R.O. Buckius, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, McGraw-Hill, 1987.*

[8] Sandler, S.I., Chemical and Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, 1982.

[9] Bloom, B.S. ed., Taxonomy of Educational Objectives, Handbook I: Cognitive Domain, Report of a Committee of College and University Examiners, David McKay, New York, 1956.

Além das referências [1] a [8] acima, que existem na biblioteca do Departamento e a que os alunos podem recorrer como elementos de estudo, foram sendo produzidos no âmbito da disciplina diversos textos de apoio que têm tido um uso generalizado, pelo menos pela razão de estarem em Português!

[10] Ventura, J.M.P., "Algumas notas sobre ciclos termodinâmicos", para os alunos de Termodinâmica II, Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1986.

[11] Ventura, J.M.P., "Combustão", texto para os alunos de Termodinâmica II, Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1986.

[12] Ventura, J.M.P., "O método da exergia", notas para os alunos de Termodinâmica II, Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1986.

[13] Pina, H. e L. Roriz, "Ar húmido", texto para os alunos de Termodinâmica II, Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1987.

[14] Ventura, J.M.P., "Termodinâmica I", texto para os alunos da disciplina, Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1988.

CHEMISTRY, GEOLOGY AND MATERIALS SCIENCE OF GEOTHERMAL SYSTEMS

M. O. S. P. Caldeira and C. A. C. Sequeira

Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex

ABSTRACT

Corrosion and scaling in geothermal systems are two of the more important problems that require the close attention of chemists, geologists, and materials scientists. Of the many constituents in geothermal fluids, key chemical species are identified that account for most corrosion phenomena in geothermal systems. Based on analysis of actual geothermal materials test data and test methods, the performance of metals in geothermal fluids is presented for carbon and stainless steels, titanium, nickel, copper, aluminium, and other alloys.

RESUMO

Os fenómenos de corrosão e de aparecimento de incrustações nos sistemas geotérmicos constituem matéria de interesse para químicos, geólogos e cientistas de materiais. Entre os constituintes dos fluidos geotérmicos, identificam-se as espécies químicas mais susceptíveis de originarem problemas de corrosão nos meios geotérmicos. Descreve-se o comportamento de metais e ligas metálicas usadas nesses sistemas.

GEOTHERMAL FLUIDS

The two geothermal fluids available are steam and water. Steam-dominated resources occur less frequently than water-dominated systems. Because of the greater abundance of water-dominated systems these resources will be emphasized in this paper. Hot dry rock and geopressured systems are mentioned only in passing.

The water in a geothermal resource is of several types, as noted by Ellis and Mahon (1). Meteoric and magmatic waters provide the primary sources and seem to be the most abundant. Meteoric water results from rain and snowball and differs from standard normal ocean water in its content of deuterium and heavy oxygen (^{18}O). Meteoric water generally has lower ^{18}O content than waters originating from magmatic sources or meteoric water that has been in contact with siliceous materials for long periods. The evidence to date suggests that geothermal fluids contain both meteoric and magmatic water; the relative amounts of each are characteristic of a particular resource.

Consider now a drop of water falling through the atmosphere. The dissolved gases in this unit of meteoric water will be in equilibrium with the atmosphere as the water strikes the earth. The important chemical agents in this fluid are water, oxygen, and carbon dioxide; all are powerful weathering agents. Water is both an active mineral solvent and a carrier for the dissolved minerals. Oxygen acts on sulfides and other minerals to form soluble products; it also acts on dead plant and animal matter to increase the rate of decay. Carbon dioxide is a mild oxidizing agent, but its primary function is found in its action on the kinds and amounts of carbonate species.

Returning briefly to plant and animal decay products, one finds that certain of these organic substances are strong weathering agents. In particular, *the humic and fulvic acid fractions are potent in briefing minerals into solution and in forming relatively stable coordination compounds.* Humic acids are characterized by carboxylic acid and phenolic functional groups. Singer and Navrot (2) found that a significant portion of the total metal content of metal-rich basalts was leached in a few hundred hours of contact with humic acid solutions at temperatures as low as 323 K.

Within the near-surface environment, the principal chemical weathering agents are water, oxygen, carbon dioxide, and decay products from plant and animal life. As these agents are transported deeper into the crust by a process termed *elutriation*, they bring about chemical changes and increase the load of dissolved solids and gases in the water and gases in the water generally.

As the water droplet penetrates still deeper into the crust, the temperature of the surrounding roch increases because of a heat flux from the molten core of the earth toward the cooler surface. This heat flux avera-

ges 0.063 J/m^2 and results in a thermal gradient that varies with the thermal conductivity of the area. Its value is usually about 20 K/km. This heat flux results in heating of the meteoric water and in accelerating rates of reaction between water and rock.

Magmatic water is released from solidifying magma. The heat source of the magma is the decay of radioactive elements, with uranium, thorium, and potassium providing most of the heat (3). As the radioactive elements are consumed, less decay heat is produced, and some of the magma crystallizes. There are local hot spots, as indicated by volcanic action, but for present purposes these can be ignored. A portion of the solidifying magma contains chemically bound water. In water-dominated fields this magmatic water eventually cools enough to form a condensed phase. (In a steam-dominated field a substantial portion of the geothermal fluid will remain as a vapor.) Although the liquid water will be free of oxygen and organic matter, it will be saturated with dissolved rock matter and contain gases such as carbon dioxide and *hydrogen sulfide*. The former is a product of carbonate decrepitation; the *latter results from the decomposition of sulfide minerals*.

The hot meteoric water and the hot magmatic water will react with other rocks in the geological formation. As they pass from one stratum to another, some minerals will be deposited and others dissolved. This geothermal fluid varies in composition according to local lithology, so that geothermal fields show profound differences in water chemistry. Furthermore, there are variations from well to well within a field, and any single well may vary in water composition with time and with the rate of water production.

Typically, *chloride and sulfate are the most abundant anions*, whereas *sodium and calcium* are the most abundant cations. Silica is the most abundant nonionic species in most geothermal waters. The ionic species are formed by the passing of the water through beds of evaporites and by the decomposition of various minerals. The silica results from dissolution of a number of mineral species, including quartz. The ionic strength of most geothermal fluids is so high that serious deviations from ideal models, such as the Debye-Huckel theory, have been observed.

The hot "rock soup" is the fluid that must be worked with. This is the fluid from which heat is abstracted for electrical power production, for space heating, or for process heat in a number of applications. This paper addresses the character of this rock soup and materials for containing, transmitting, and handling it.

SCALING AND CORROSION

Once the geothermal fluid is available for use, two important technological problems confront us; these are *scaling* and *corrosion*. The scaling minerals are typically *silica* and *calcite*, although sulfides are important in some fields. Corrosion products are a second source of scale. Both of these sources of scale are important because of the adverse effect of scale on heat transfer and pumping efficiencies.

The species in the water that are of greatest interest in relation to corrosion are *hydrogen ion, chloride ion, hydrogen sulfide, carbon dioxide, oxygen, transition metal ions, ammonia*, and *sulfate ion* (4). Some generalizations related to the corrosive effects of these species are noted here:

Hydrogen Ion – The general corrosion rate of carbon steels increases rapidly with increasing hydrogen ion (decreasing pH), especially below pH 7. The passivity of many alloys is pH dependent. Breakdown of passivity at local areas can lead to serious forms of attack, such as pitting, crevice corrosion, and stress corrosion cracking.

Chloride – Chloride (Cl^-) causes local breakdown of passive films,

which protect many metals from uniform attack. Local penetration of this film can cause pitting, crevice corrosion, or stress corrosion cracking. Uniform corrosion rates can also increase with increasing chloride concentration, but this action is generally less serious than local forms of attack.

Hydrogen Sulfide – Probably the most severe effect of hydrogen sulfide (H_2S) is its attack on certain copper and nickel alloys. These alloys have performed well in seawater but are practically unusable in geothermal fluids containing H_2S. The effect of H_2S on iron-based materials is less predictable. Accelerated attack occurs in some cases and inhibition in others. High-strength steels are often subject to sulfide stress cracking. Hydrogen sulfide may also cause hydrogen blistering of steels. Oxidation of H_2S in aerated geothermal process streams increases the acidity of the stream.

Carbon Dioxide – In the acidic region, carbon dioxide (CO_2) can accelerate the uniform corrosion of carbon steels. The pH of geothermal fluids and process streams is largely controlled by CO_2. Carbonates and bicarbonates can display mild inhibitive effects.

Ammonia – Ammonia (NH_3) can cause stress corrosion cracking of some copper alloys. It may also accelerate the uniform corrosion of mild steels.

Sulfate – Sulfate ($SO_4^=$) plays a minor role in most geothermal fluids. In some low-chloride streams, sulfate will be the main aggressive anion. Even in this case, it rarely causes the same severe localized attack as chloride.

Oxygen – The addition of part-per-billion quantities of oxygen (O_2) to a high-temperature geothermal system can greatly increase the chance of severe localized corrosion of normally resistant metals. The corrosion of carbon steels is sensitive to trace amounts of oxygen.

Transition Metal Ions – "Heavy" or transition metal ions might also be included as key species. Their action at low concentration on most construction materials is ill defined. *However, the poor performance of aluminium alloys in geothermal fluids may be due in part to low levels of copper or mercury in these fluids.* Some oxidized forms of transition metal ions (Fe^{3+}, Cu^{2+}, and others) are corrosive, but these ions are present in the lowest oxidation state (most-reduced form) in geothermal fluids.

Oxygen can convert Fe^{2+} to Fe^{3+}, which is another reason to *exclude oxygen from geothermal streams.*

Corrosive attack of metals in geothermal systems can occur in several of the following forms (4 - 6):

Uniform Corrosion – This is a general, allover attack of the metal surface. Uniform corrosion is often promoted by chloride, carbon dioxide, oxygen, or ammonia.

Pitting – Pitting is a localized form of attack, which results in the development of small pits in the metal surface. Pitting is often associated with the breakdown of a protective film or surface scale.

Crevice Corrosion – Crevice corrosion is similar to pitting in that it is a localized attack. Unlike most other forms of corrosion, it is geometry dependent and forms in the crevices of equipment.

Stree Corrosion Cracking – Stress corrosion cracking (SCC) is a catastrophic type of failure promoted by a combination of tensile stress and the presence of chloride ion in the environment. The presence of oxygen and increasing temperature increase the severity of attack.

Sulfide Stress Cracking – Sulfide stress cracking (SCC) is a catastrophic failure that results from exposure under stress of susceptible materials to environments containing H_2S in an aqueous phase. In contrast to stress corrosion cracking, SSC decreases in severity with increasing temperature, but oxygen may have little, if any, effect

on the SSC mechanism. On the other hand, low pH greatly accelerates failure.

Hydrogen Blistering – Rupture of metallic materials results when hydrogen trapped in voids accumulates at a sufficient pressure. The material need not be under stress for hydrogen blistering to occur.

Intergranular Corrosion – Intergranular corrosion is preferential corrosion at or adjacent to grain boundaries, with little or no attack on the bodies of the grains. The alloy disintegrates (grain fall out) or loses its strength, or both.

Galvanic Corrosion – This occurs when two metals are electrically connected. Corrosion of the less noble material will be accelerated. Materials may be ordered in a galvanic series (by increasing nobility) to help in materials selection. Care must be taken because the order of metals may change with variations in chemistry and temperature.

Corrosion Fatigue – Corrosion fatigue is premature fracture when cyclic stresses are imposed on a material in a corrosive environment. The corrosion fatigue limit is the greatest unit stress that may be applied under given conditions of stress, rate of stress application, temperature, and corrosive environment without causing the material to fail in a given number of cycles of stress (7). The combined effects of cyclic stress and corrosion are often far more severe than the simple sum of their actions.

Exfoliation – This involves the formation of discrete layers of corrosion products or of metal separated from the lattice by corrosion products. The layers may break loose, damaging downstream components.

MATERIALS SELECTION

The selection of materials for applications in geothermal environments is one area which chemists, metallurgists, and materials scientists can make a significant contribution to the geothermal effort. The responses of plain carbon and low-alloy steels, stainless steels, nickel-based alloys, copper-base alloys, aluminium, titanium, and other materials are briefly reviewed in relation to common unflashed geothermal fluids.

Plain Carbon and Low-Alloy Steels – Experience with these materials indicates that severe pitting and crevice corrosion occur, in addition to less severe uniform corrosion. The alloyed materials show more resistance but should not be selected without a site-specific test that simulates the intended usage of the materials. These materials are subject to hydrogen blistering, especially in sulfide environments, and to sulfide stress cracking in the higher strength grades. Galvanic corrosion is strongly dependent on the coupling material, and, in our experience, the corrosion of low-carbon steels is greater when the cathodic material is brass rather than stainless steel.

Stainless Steels – Ferritic alloys are subject to pitting and crevice corrosion, especially in stagnant conditions. However, some high-alloy ferritic stainless steels have shown very good resistance to a moderate-temperature geothermal fluid (8). Austenitic alloys are prone to stress corrosion cracking, and at least one instance of this form of attack has been seen in geothermal usage. These alloys are also subject to localized and intergranular corrosion. Testing of these alloys should include the evaluation of oxygen intrusion into the geothermal fluid. Martensitic alloys suffer from the same forms of corrosion as ferritic and austenitic stainless steels. Stainless steels should be tested in the proposed environment prior to being selected for use. Further, the testing should simulate the effects of oxygen on the alloys to evaluate their response to a stress corrosion cracking environment.

Nickel Alloys – High-nickel alloys are frequently used to combat severe corrosion problems. The nickel-chromium-mobybdenum alloys appear to be the most applicable to high-temperature geothermal fluids. Inconel 625 and Hastelloy C-276

are particularly resistant to corrosion. These alloys can tolerate very high flow rates and occasional aeration. Similar alloys containing iron in place of molybdenum face competition from the most resistant stainless steels, but may find applications where their mechanical properties are desirable. Cupronickels will have limited usefulness in geothermal streams containing even trace quantities of H_2S.

Copper Alloys – The use of copper alloys in geothermal fluids is severely limited by the relatively high concentrations of sulfide found in most sources. The Raft River, Idaho, KGRA, with a low sulfide concentration of 0.1 ppm, appears to be an exceptional case. Even in this fluid, the performance of coppernickel alloys has been very poor. Although some nickel-free brasses and bronzes have performed well in testing, dealloying of some copper alloys has been observed (8).

The *cracking of some copper-based alloys while exposed to ammonia or ammonia derivates is known as "season cracking" (9) or ammonia SCC.* Provided NH_3 and NH_4^+ levels are low, cracking by ammonia species in the liquid phase of geothermal fluid should be limited to stagnant areas. Susceptibility of copper-zinc brasses to cracking increases with increasing zinc concentration.

Aluminium Alloys – Aluminium alloys have been recommended for desalination applications. Their use in geothermal environments cannot be recommended because of the very high corrosion rates that have been encountered.

Titanium Alloys – Titanium and its alloys are among the most resistant materials tested to date. However, experience in other environments suggests that at temperatures above 573 K these materials are subject to crevice corrosion. Fluorides specifically attack titanium, and, therefore, this material should be avoided where fluoride-rich waters are encountered.

Other Alloys – Cobalt-base alloys are noted for their hardness and can be used in geothermal environments when this characteristic is desirable. Zirconium has very good corrosion resistance in a number of environments, but the cost of these materials is such that no applications to geothermal environments are projected.

CONCLUSION

Corrosion and scaling in geothermal systems are two of the more important problems that require the close attention of chemists, geologists, and materials scientists. These problems result from the nature of the geothermal fluids encountered as systems are designed and built to take advantage from these resources. The geothermal fluid, in turn, is a result of the environment from which it is extracted. The history of the fluid as it comes into contact with various minerals is the key to understanding the tendency of these fluids to promote scaling and corrosion and, as a consequence, making rational materials selections for plant construction. Of the many constituents in geothermal fluids, seven key chemical species are identified that account for most corrosion phenomena in geothermal systems. These species are: oxygen, hydrogen, sulfide, carbon dioxide, ammonia, chloride, sulfate and hydrogen ion concentrations. Based on analyses of actual geothermal materials test data and test methods, the performance of metals in geothermal media is presented for carbon and stainless steels, titanium, nickel, copper, and many other alloys. Eventually, sufficient data on and insight into the chemistry of geothermal fluids will be available to permit adequate materials selection without longterm corrosion tests.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been carried out with the financial support of the EEC, contract Joule - JOUG - 0005 - C (EDB).

REFERENCES

[1] Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J., Chemistry and Geothermal Systems, Academic Press, New York, 1977, p. 28.

[2] Singer, A. and Navrot, J., Nature, Vol. 262, 1962, pp 479-481.

[3] Bullard, E., Geothermal Energy, Earth Sciences, Vol. 12, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, New York, 1973, pp. 19-28.

[4] DeBerry, D.W., Ellis, P.F., and Thomas, C.C., Materials Selection Guidelines for Geothermal Power Systems, USDOE Report ALO/3903-1, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., Sept., 1978.

[5] Couzet, I., Corrosion in Geothermy: An Analysis of Current Data and of Investigations Methods, EEC Contract EN3G-0086-B (G.D.F.). Final Report, 1988.

[6] Fouillac, C., Goyeneche, O., Lombart, R. and Spiteri, P., Hydrogéologie – Géologie de l'Ingenieur, Vol.1, 1984, pp. 99-110.

[7] Wescott, B.B., Mechanical Engineering, Vol. 60, 1938, pp. 813-821.

[8] Miller, R.L., Results of Short-Term Corrosion Evaluation Tests at Raft River, USDOE, Report TREE-1176, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., Oct. 1977.

[9] Fontana, M.G. and Greene, N.D., Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York, 1978.

NIL CONTRIBUTION OF THE COSMOLOGICAL CONSTANT TO THE PLANE GRAVITATIONAL WAVES IN GENERAL RELATIVITY

K. S. Adhav* and T. M. Karade
Department of Mathematics, Nagpur University, Nagpur – 440010 – India

ABSTRACT

From the Takeno's study of the plane gravitational waves in general relativity, it is observed that the cosmological term $\bar{Y}$ plays no role and hence its introduction in the field equations is not necessary.

INTRODUCTION

The relativistic field equations first proposed by Einstein are

$$R_{ij} - \frac{1}{2} R g_{ij} + \wedge g_{ij} = -8\pi T_{ij}$$

where $\wedge$ is a cosmological constant (see Tolman 1934).

In empty region with all the components of T_{ij} equal to zero we find that the above field equations reduce to the simpler equations

$$R_{ij} = \wedge g_{ij} \qquad (1)$$

To the dimension of the solar system the effect of $\wedge$ term is negligible because the motions of the planets correspond with great precision to the field equations

$$R_{ij} = 0 \qquad (2)$$

However, for regions of greater size a cosmological term may not necessarily be equal to zero. Therefore, it is worth to study the plane gravitational waves in reference to equations (1) instead of equations (2) with respect which Takeno (1961) has developed the theory of plane gravitational waves in general relativity. As a matter of fact, Takeno has shown that an empty space-time field equations (1) has no exact plane wave solution in the sense of the definition. We observe that this finding can also be deduced right from violation of the signature convention of the underlying space-time. In this short communication we prove that the consideration of the plane gravitational waves in the empty region with equations (1) yields equations (2), thereby $\wedge$ contributing nil to the plane waves in general relativity.

---

* Teacher fellow from the department of Mathematics, Shri Shivaji Science College, AMRAVATI.

FIELD EQUATIONS

For generalisation we extend the Takeno's definition of a plane wave as follows: A plane wave g_{ij} is a non flat solution of equations (1) with the property that in some suitable coordinate system

$$g_{ij} = g_{ij}(Z) \quad , \quad (x^i = x,y,z,t) \tag{3}$$

which satisfy

$$g^{ij} Z_{,i} Z_{,j} = 0 \quad \left(,i = \frac{\partial}{\partial x^i} \right) \tag{4}$$

$$Z = Z(z,t) \quad , \quad (Z_{,3} \neq 0 \; ; \; Z_{,4} \neq 0). \tag{5}$$

The signature convention is that of Takeno i.e.

$$g_{aa} < 0 , \tag{6}$$

$$\begin{vmatrix} g_{aa} & g_{ab} \\ g_{ba} & g_{bb} \end{vmatrix} > 0 , \tag{7}$$

$$\begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{vmatrix} < 0 .$$

$$g_{44} > 0 \quad , \quad g = \det(g_{ij}) < 0$$

(not summed for a and b; a,b = 1,2,3).

In the notations of Takeno, we get

$$R_{ab} = \frac{\rho_a \rho_b}{2M^2} \quad . \quad (a,b = 1,2)$$

where $\rho_a = \bar{g}_{ai} w^i \; ; \; w^i = \phi \, g^{3i} + g^{4i} \; ; \; w = t + z\phi$:

$$Z_{,3} = \frac{\phi}{M} \; ; \; Z_{,4} = \frac{1}{M} \; ; \; M_{,3} = \frac{\phi N}{M} - \bar{\phi} \; ; \; M_{,4} = \frac{N}{M} \; ;$$

$$M = \overline{w} - z\overline{\phi} \quad ; \quad N = \overline{\overline{w}} - z\overline{\overline{\phi}}$$

and the bar (-) over a letter means the derivative with respect to Z. Then the field equations (1) for a,b = 1,2 become

$$\rho_a \rho_b = 2 \wedge M^2 g_{ab} \tag{8}$$

which gives

$$(\rho_1)^2 = 2 \wedge M^2 g_{11} \tag{9}$$

$$(\rho_2)^2 = 2 \wedge M^2 g_{22} \tag{10}$$

and

$$\rho_1 \rho_2 = 2 \wedge M^2 g_{12} \tag{11}$$

i.e.

$$\rho_1^2 \rho_2^2 = 4 \wedge^2 M^4 (g_{12})^2$$

Using equations (9) and (10) we get

$$(2 \wedge M^2 g_{11})(2 \wedge M^2 g_{22}) = 4 \wedge^2 M^4 (g_{12})^2$$

$$\Rightarrow \quad g_{11}\, g_{22} = (g_{12})^2$$

$$\Rightarrow \quad \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} = 0 \tag{12}$$

which violates equation (7).

Thus the study of the plane gravitational waves in the empty space-time field equations (1) ultimately reduces to equations (2) giving $\wedge = 0$.

CONCLUSION

It seems that the introduction of the cosmological term Λ in the field equations of general relativity is not necessary as far as its role in the study of plane gravitational waves is concerned.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are thankful to Professor De Abreu Faro for constant encouragement.

REFERENCES

[1] Takeno H., The mathematical theory of plane gravitational waves in general relativity, Scientific reports of the research institute for theoretical physics, Hiroshima University, 1961.

[2] Tolman R.C., Relativity Thermodynamics and Cosmology, 1934.

A CILINDRICALLY SYMMETRIC COSMOLOGICAL MODEL IN BIMETRIC RELATIVITY

Shailendra Deo
Department of Mathematics, Nagpur University Campus, Nagpur-440 010, India.

ABSTRACT

In this paper, a cylindrically symmetric cosmological model is studied in the context of bimetric relativity, taking the source as a perfect fluid distribution. It is shown that the model does not exist in bimetric relativity.

1 INTRODUCTION

Rosen N [2] proposed a bimetric theory of relativity, where there exists two metric tensors at each point of space-time – g_{ij} which describes gravitation and background metric γ_{ij} which enters into the field equations directly with matter. Accordingly, at each space-time point one has two line elements

$$ds^2 = g_{ij}\, dx^i\, dx^j$$

and

$$d\sigma^2 = \gamma_{ij}\, dx^i\, dx^j$$

This theory is based on a simple form of Lagrangian and has a simpler mathematical structure than that of the general relativity.

Here a cylindrically symmetric non-static Einstein-Rosen cosmological model is studied when the source is perfect fluid distribution.

2 FIELD EQUATIONS AND MODEL

Field equations of bimetric relativity formulated by Rosen N. [2] are

$$K_i^j = N_i^j - \frac{1}{2} N g_i^j = -8\pi k T_i^j \tag{1}$$

where

$$N_i^j = \frac{1}{2}\gamma^{\alpha\beta}(g^{hj} g_{hi|\alpha})_{|\beta} \tag{2}$$

$$N = N_\alpha^\alpha, \quad k = \left(\frac{g}{\gamma}\right)^{1/2} \tag{3}$$

a vertical bar (|) denotes the covariant differentiation with respect to γ_{ij}. The energy-momentum tensor T_i^j for a perfect fluid distribution is given by

$$T_i^j = (p+\rho)\, v_i v^j + p g_i^j \tag{4}$$

together with the orthogonality condition $v_4 v^4 = -1$, where v^i is the four-velocity vector of the fluid and p, ρ are the proper pressure and the energy density of matter respectively.

Let us consider the cylindrically symmetric non-static Einstein-Rosen cosmological model [1] given by

$$ds^2 = e^{2(\alpha-\beta)}(dT^2 - dR^2) - R^2 e^{-2\beta} d\phi^2 - e^{2\beta} dz^2 \tag{5}$$

where α,β are functions of R and T, and the convention is

$$x^1 = R,\ x^2 = \phi,\quad x^3 = Z \text{ and } x^4 = T.$$

The flat-metric corresponding equation (5) is

$$d\sigma^2 = dT^2 - dR^2 - R^2 d\phi^2 - dz^2 \tag{6}$$

For this metric non-vanishing γ-Christoffel symbols are

$$\Gamma^2_{12} = \Gamma^2_{21} = R^{-1} \quad \text{and} \quad \Gamma^1_{22} = -R \tag{7}$$

Using equations (1) to (7) the field equations yield

$$R^{-2}\ \text{Sinh}\ 2\alpha = -8\pi k p \tag{8}$$

$$\alpha'' + R^{-1}\alpha' - \ddot{\alpha} - R^{-2}\ \text{Sinh}\ 2\alpha = -8\pi k p \tag{9}$$

$$\alpha'' + R^{-1}\alpha' - \ddot{\alpha} - 2\beta'' - 2R^{-1}\beta' + 2\ \ddot{\beta} = -8\pi k p \tag{10}$$

$$0 = 8\pi k \rho \tag{11}$$

where

$$\alpha' \equiv \frac{\partial \alpha}{\partial R},\quad \alpha'' \equiv \frac{\partial^2 \alpha}{\partial R^2}$$

and

$$\dot{\alpha} \equiv \frac{\partial \alpha}{\partial T},\quad \ddot{\alpha} \equiv \frac{\partial^2 \alpha}{\partial T^2} \quad \text{etc.}$$

Equation (11) implies

$$\rho = 0 \tag{12}$$

It shows that there is no contribution from perfect fluid distribution to the cylindrically symmetric non-static Einstein-Rosen cosmological model in bimetric relativity. The field equations (8) to (10) become -

$$R^{-2}\ \text{Sinh}\ 2\alpha = 0 \tag{13}$$

$$\alpha'' + R^{-1}\alpha' - \ddot{\alpha} - R^{-2}\ \text{Sinh}\ 2\alpha = 0 \tag{14}$$

$$\alpha'' + R^{-1}\alpha' - \ddot{\alpha} - 2\beta'' - 2R^{-1}\beta' + 2\ \ddot{\beta} = 0 \tag{15}$$

From equation (13) we get

$$\alpha = 0 \tag{16}$$

Equation (15) and (16) imply

$$\beta'' + R^{-1}\beta' - \ddot{\beta} = 0 \tag{17}$$

For solving equation (17)

Case 1: Let us consider $\beta = H(r,t) + G(t)$

then the equation (17) gives the Bessel equation

$$H'' + \frac{1}{R}H' - \ddot{H} = 0 \tag{18}$$

representing cylindrical waves, provided

$$\ddot{G} = 0 \tag{19}$$

The Bessel equation (18) results in

$$H = a\,J_0(hR)\text{Cos}(ht + c_1) + bY_0(hR)\text{Sin}(ht + c_2) \tag{20}$$

where $J_0(hR)$ and $Y_0(hR)$ are the Bessel functions of first and second kind of order zero respectively, h is the frequency and a, b, c_1, c_2 are arbitrary constants.

On integration, (19) gives

$$G = c_3 t + c_4 \tag{21}$$

where c_3, c_4 are arbitrary constants of integration

Then

$$\beta = a\ J_0(hR)\mathrm{Cos}(ht + c_1) + b\ Y_0(hR)\mathrm{Sin}(ht + c_2) + c_3 t + c_4 \tag{22}$$

Case II: Let us consider $\beta = H(r,t) + g(r)$.

In this case again we obtain equation (18) provided,

$$g'' + R^{-1}g' = 0 \tag{23}$$

it gives us

$$g = c_5 \tag{24}$$

where c_5 is an arbitrary constant of integration.

Now the solution turns out to be

$$\beta = a\ J_0(hR)\mathrm{Cos}(ht + c_1) + b\ Y_0(hR)\mathrm{Sin}(ht + c_2) + c_5 \tag{25}$$

where constants could be found using initial as well as boundary conditions from the above equations.

REFERENCES

[1] Einstein A and Rosen N (1937) J. Frank, Inst. 223, 43.

[2] Rosen N (1973) Gen. Rel. Grav. 4, 435.

Kodak

Canon

PHILIPS

- EQUIPAMENTO PROFISSIONAL
- ILUMINAÇÃO • CÂMERAS DE MÉDIO E GRANDE FORMATO
- REVELAÇÃO DE SLIDES EM 1 HORA
- FOTOS A CORES EM 1 HORA ATÉ 20 × 30
- IMPRESSÃO DE PHOTO CD
- SLIDES E CÓPIAS EM PAPEL A PARTIR DE SUPORTES INFORMÁTICOS
- CD/ROMS — NORMA XA
- LEITORES DE CDI (Compacto Disco Interactivo) GRANDE VARIEDADE DE SOFTWARE P/ CDI

RUA VISCONDE SANTARÉM, 75-C (junto ao Técnico) TEL. 352 51 66
PR. ALVALADE, 2-D (entre o BPA e o BTA) TEL. 793 24 75

IV PROGRAMA-QUADRO DE FORMAÇÃO, INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
1994-1998

- LEONARDO DA VINCI
- SOCRATES
- TEMPUS II
- ALFA
- ACTS
- ESPRIT III
- BRITE/EURAM III
- VALUE II
- IMPACT II
- SPRINT

INFORMAÇÕES: GIRE-GABINETE DE INFORMAÇÃO E DE APOIO ÀS RELAÇÕES COM O EXTERIOR
TEL.: 841 73 62, 841 71 63, 841 75 54.

A REFLECTOMETRIC SYSTEM FOR THE TOKAMAK ISTTOK[1]

P. Varela, A. Silva, S. Vergamota, F. Serra
M. E. Manso, J. A. C. Cabral[2] and C. A. F. Varandas

Centro de Electrodinâmica, Instituto Superior Técnico, 1096 Lisboa Codex

ABSTRACT

In the present paper a broadband microwave reflectometric system presently beeing developed for the tokamak ISTTOK is presented. The diagnostic will measure the plasma density profiles and fluctuations. The basic principles of density profile evaluation with microwave reflectometry are reviewed and the application of the theoretical model to ISTTOK is discussed. Also, the specific features of the system and its main characteristics and diagnostic capabilities are presented.

1 INTRODUCTION

The production of a plasma in a tokamak during a few seconds aims to produce nuclear energy from thermonuclear controlled fusion. The rate of fusion reactions is fundamentally determined by the ion temperature T_i and the *Lawson* parameter $n_a\tau_e$ where n_a is the density of reacting particles and τ_e is the ratio of the stored energy to the input power or energy confinement time.

As the plasma is electrically neutral ($n_e = n_i$) the knowledge of both n_e and the density of impurities (given by spectroscopy) leads to the determination of the density of reacting particles.

On the other hand, τ_e depends strongly on the spatial evolution of the electronic density (peaked profiles lead to better confinement times than flat ones). In addition the energy confinement time depends on localized fluctuations of the plasma parameters related to various instabilities. An increase in the level of fluctuations can be correlated with a decrease in τ_e.

The measurement of the electron density profile $n_e(r)$ as well as of the characteristics of density fluctuations are therefore of fundamental importance to understand the physical processes involved in the fusion plasma.

The two standard techniques which are currently used to probe the electronic density in high temperature plasmas are *Transmission Microwave Interferometry* and *Thomson Scattering*; they lack however in general information about the edge region. Although this could be in part provided by *Langmuir* probes, a radial plasma region still remains where no data can be obtained by any of these diagnostics. In addition *Thomson Scattering* and *Interferometry* require multiple viewing chords to obtain spatial information about n_e. The increasing restrictions in access to the machines limits the number of viewing chords that can be installed resulting in poor spatial resolution of the measurements.

A technique which can meet the requirements of reduced access and good spatial resolution is *Microwave Reflectometry*. Basically, reflectometry is based on the propagation and reflection of an incident microwave beam in the inhomogeneous plasma. The frequency of the incident wave f determines the value of the electronic density at the reflection layer. From the phase shift $\phi(f)$ that waves with frequencies f between 0 and F undergoes in the plasma the position of each reflection layer can be inferred.

---

[1] The "ISTTOK-Project" is supported by "Instituto Superior Técnico", "Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica" and the "European Atomic Energy Community (EURATOM)".

[2] Also belonging to "Centro de Electrodinâmica – Instituto Nacional de Investigação Científica".

Here we describe the development of a reflectometric system for the tokamak ISTTOK [1] with the possibility of broadband microwave sweeping and fixed frequency operation. The main purposes of the diagnostic are: *(i)* the measurement of density profiles; *(ii)* the study of density fluctuations in the gradient and edge regions of the plasma; *(iii)* experiments of radial correlation of the fluctuations parameters.

2 THEORY

2.1 Basic principles of microwave reflectometry

Microwave Reflectometry is based on the total reflection experienced by a electromagnetic wave on the cutoff layer, where the refractive index vanishes. Propagation is perpendicular to the magnetic field lines ($k \perp B$). The waves can be launched with their electric field either parallel ($E \parallel B$) or perpendicular ($E \perp B$) to the magnetic field corresponding respectively to the *Ordinary mode (O)* and to the *Extraordinary* mode *(X)*. The refractive index for these two modes, within a cold plasma approximation ($v_{the} << c$) and neglecting the motion of the ions ($m_e << m_i$) and the damping effect of collisions ($f >> \nu_{ei}$), can be written as:

$$N_O^2 = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2} \tag{1}$$

$$N_X^2 = 1 - \frac{\frac{f_{pe}^2}{f^2}\left(1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2}\right)}{1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2} - \frac{f_{ce}^2}{f^2}} \tag{2}$$

Here f_{pe} and f_{ce} are the electron plasma frequency and the electron cyclotron frequency:

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}} \tag{3}$$

$$f_{ce} = \frac{1}{2\pi}\frac{eB}{m_e} \tag{4}$$

where e and m_e are the charge and mass of the electron, ε_0 is the free space permittivity and B is the magnetic field.The corresponding cutoff frequencies are

$$f_O = f_{pe} \tag{5}$$

$$f_{pe}^2 = f_{Xl}^2 + f_{Xl} \cdot f_{ce} \tag{6}$$

$$f_{pe}^2 = f_{Xh}^2 - f_{Xh} \cdot f_{ce} \tag{7}$$

where f_{Xl} and f_{Xh} are the low and high cutoff frequencies for the X mode. In the density range of interest, the lower cutoff corresponds to very low frequencies and therefore only the upper cutoff is considered. Two possibilities

exist thus for wave reflection, corresponding to the *O* mode and upper *X* mode cutoffs. For the ISTTOK reflectometer we have selected the *O* mode wave propagation. One of the reasons for this choice is that N_o depends only on n_e, and the density profile evaluation is more straightforward. On the other hand, N_x depends both on n_e and *B*. This dependence on *B* is a serious drawback of the *X* mode since it makes reflectometry information dependable on another diagnostic (to measure *B*). Also, *O* mode reflection layers occur at lower frequencies compared with *X* mode which bring additional practical advantages, since microwave components are less expensive at lower frequencies. In the following we will refer only to the *O* mode.

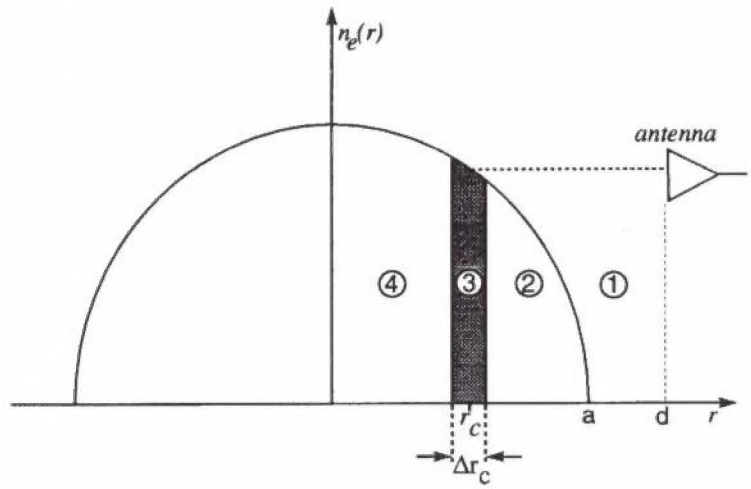


Figure 1: Four different regions can be considered in the plasma. In region 1 $f >> f_{pe}$ and the wave travels at the speed of light. In region 2 $f > f_{pe}$ and the wave propagates with the plasma refractive index *N(r)*. Region 3 is the reflecting region, where the refractive index decay to zero. In region 4 $f < f_{pe}$ and the wave is evanescent.

The position of the reflecting layer $r_c(f)$ is basically determined from the phase shifts $\phi(f)$ which the probing waves suffered in its propagation through the plasma. The phase shift for each frequency *f* can be found by matching an approximate WKB solution of the wave equation

$$\frac{d^2E_i(r)}{dr^2}+\frac{w_i^2}{c^2}N^2(r)E_i(r)=0 \qquad (8)$$

outside the reflecting layer to the exact solution near the reflecting layer. Let us consider four different plasma regions as shown in figure 1. In region 1 $f >> f_{pe}$ and the electromagnetic wave travels with $N(r) = 1$ and velocity *c*. In this region the electric field of the wave takes the simple form

$$E_i(r)=\alpha_i e^{-ik_0r}+\beta_i e^{ik_0r} \qquad (9)$$

where k_o is the wave propagation vector in the free space, $k_o=2\pi\ f/c$. In region 2 we have $f > f_{pe}$. The refractive index is always positive, $N(r) \leq 1$, and the wave can propagate through the plasma. The WKB approximation may be used to solve equation 8 if the inequality

$$\left|\frac{3}{4k_0^2}\frac{1}{N(r)^3}\left(\frac{\partial N(r)}{\partial r}\right)^2-\frac{1}{2k_0^2N(r)^2}\left(\frac{\partial^2N(r)}{\partial r^2}\right)\right| << 1 \qquad (10)$$

can be applied. In that case the solution of equation 8 is given by

$$E_i(r) = \frac{\alpha_2}{\sqrt{N(r)}} e^{-ik_0 \int_0^r N(r)dr} + \frac{\beta_2}{\sqrt{N(r)}} e^{ik_0 \int_0^r N(r)dr} \qquad (11)$$

In region 3 the refractive index decay very quickly to zero and the WKB approximation is not valid there. Thus, an exact solution of equation 8 is needed. Defining $V_c(r_c)$ as a small region around the reflection point r_c, where the refractive index can be considered linear and making the variable change [2]

$$\chi = \left[\left(\frac{\partial n_e(r)}{\partial r} \right)_{rc} \frac{e^2}{\varepsilon_0 m_e c^2} \right]^{1/3} (r - r_c) \qquad (12)$$

equation 8 can be written in the form

$$\frac{d^2 E_i(\chi)}{d\chi^2} - \chi E_i(\chi) = 0 \qquad (13)$$

The solution of the above equation is

$$E_i(\chi) = \alpha_3 A_i(\chi) + \beta_3 B_i(\chi) \qquad (14)$$

where $A_i(\chi)$ and $B_i(\chi)$ are the Airy functions. In region 4 the refractive index is always negative and the wave is evanescent. However in this region the WKB solution can be used and the solution of equation 8 is

$$E_i(r) = \frac{\alpha_4}{\sqrt{N(r)}} e^{-ik_0 \int_0^r N(r)dr} + \frac{\beta_4}{\sqrt{N(r)}} e^{ik_0 \int_0^r N(r)dr} \qquad (15)$$

The constants α_i and β_i are determined by the continuity equations between adjacent regions. The exact solution is valid in the reflecting region, $]r_c - \varepsilon, r_c + \varepsilon[$, while the WKB solution is valid in the propagating region. Matching the two solutions, it can be shown [3] that

$$\phi(f) = \frac{4\pi f}{c} \int_{r_c(f)}^{a} N(r)dr - \frac{\pi}{2} \qquad (16)$$

where $\phi(f)$ is the phase shift due only to the propagation path in the plasma – from a (where $n_e = 0$) to the reflecting layer $r_c(f)$. The term $\pi/2$ is related to the non-metallic character of the reflection in the plasma.

The width of the reflecting layer, (2ε), can be estimated as the width of the region where the exact solution and the WKB solution differ by less than ~1%. In terms of χ and for a parabolic profile (2ε) is estimated by $-2 \leq \chi \leq 5$. The spatial resolution of the measurements correspond to the error in the location of the layer where the electric field vanishes which is given by the difference between $\chi=0$ (WKB solution) and $\chi=-2$ (exact solution).

2.2 Density profile evaluation

For the case of *O* mode wave propagation the density at the reflecting layer for each probing frequency *f* is given by

$$n_c(f) = 4\pi^2 \frac{\varepsilon_0 m_e}{e^2} f^2 \qquad (17)$$

The location of the reflecting layer can be determined by analytically inverting equation (16) which yields:

$$a - r_c(f) = \frac{c}{2\pi^2} \int_0^f \frac{d\phi(F)}{dF} \frac{1}{(f^2 - F^2)^{1/2}} dF \qquad (18)$$

For the case of X mode propagation the refractive index is given by equation (2). Due to its greater complexity it is not possible to analytically invert equation (16) and therefore a numerical invertion has to be performed in order to obtain r_c.

2.3 Density fluctuations measurements

Density fluctuations affect the refractive index thus the characteristics of the propagating wave, namely its electric field. The importance of the fluctuations depends both on the local refractive index of the plasma and on the relation between the spatial scale length of the fluctuations $\Lambda = 2\pi / |\vec{k}_\perp|$ and the probing wavelength λ:

(i) *Small-scale density fluctuations* — When $\Lambda \leq \lambda$ a significant part of the incident energy is scattered, due to the non-linear interaction between the incident wave $(\omega_i, \vec{k}_{i\perp})$ and the Fourier component $(\Omega, \vec{k}_\perp)$ of the oscillating modes perturbing the plasma, with frequencies $\omega_s = \omega_i \pm \Omega$ and along directions defined by $\vec{k}_{s\perp} = \vec{k}_{i\perp} \pm \vec{k}_\perp$.

(ii) *Large-scale density fluctuations* — When $\Lambda >> \lambda$ the scattering effects are negligible and phase modulations $(\Delta\phi)$ occurs which are mainly due to fluctuations localized in the reflection region.

Several methods have been developed to analyse the reflectometer information concerning the fluctuations in the low frequency range ($f < 20$ KHz) associated with large-scale MHD activity. A method based on the harmonic contents of the detected signal has been proposed [4] and the contributions to the phase perturbations of the localization of the fluctuations were studied in detail, both in the reflecting layer $(\Delta\phi_r)$ and in the propagation region $(\Delta\phi_p)$. For typical fluctuations $\Delta\phi_r >> \Delta\phi_p$. Based on phase measurements [5], a method has been proposed where the localization of the fluctuations is estimated by comparison of measured $\Delta\phi(f)$ with values computed assuming perturbed density profiles. The standard model for a MHD density perturbation is used. Another method [6] based on the spectral analysis of the detected signals, aimed at the evaluation of the fluctuations level and localization. Later, some other methods using WKB approximation and based on the phase shift modulation in inhomogeneous plasma density profiles have been developed [7], [8]. A more accurate modeling of the scattered field was recently obtained using the full wave equation, [9].

More recently the problem of wave scattering by the fluctuations close to a cutoff layer and its application to fluctuations measurements have been studied [10]. For probing waves propagating along the plasma gradient, the model shows that the reflectometry diagnostic is local and sensitive only to fluctuations with low wavenumbers, $k_r < (\omega/c)^{2/3} L_N^{1/3}$. Turbulence, generally with higher wavenumbers, lead to weak localization except in steep gradient density profiles. However if propagation in the k_{yi} is allowed good localization of turbulence, with $k_{yr} = k_{ys} - k_{yi}$ can be obtained.

3 REFLECTOMETRIC SYSTEM

The specific features of the system are discussed in the next paragraphs where the theoretical model is analysed in its application to the

tokamak ISTTOK. The main characteristics of the system are also presented.

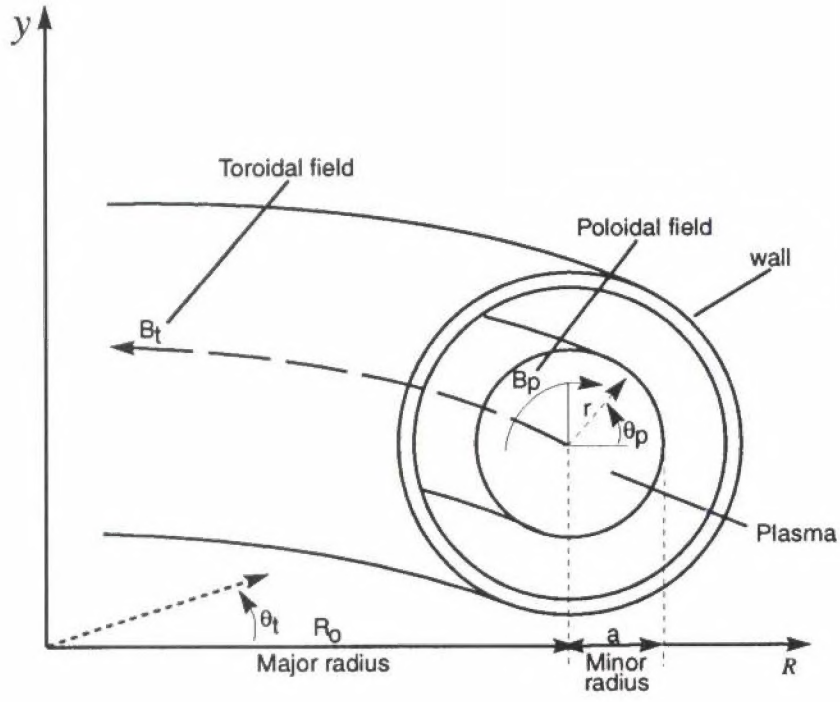


Figure 2: Geometry of a tokamak plasma. The coordinate system used as well as the poloidal and toroidal magnetic fields are also shown.

3.1 ISTTOK

Figure 2 shows the typical geometry of a tokamak plasma. It has a toroidal configuration characterized by a major radius R_o and a minor radius a. Taking into account this geometric configuration we can use a toroidal coordinate system and therefore the spatial coordinates of a tokamak plasma can be defined by a toroidal angle θ_t, a poloidal angle θ_p and a minor radius r.

The magnetic field in a tokamak has two components: *(i)* a toroidal magnetic field B_t produced by external coils that varies inversely with $R=R_o+r$ and is nearly independent of θ_t; *(ii)* a poloidal magnetic field B_p produced by the plasma current I_p which depends on r. The main parameters of the tokamak ISTTOK are summarized in Table 1. In tokamaks $B_t >> B_p$.

Parameter	*Value*
Minor radius, a	8.5 cm
Major radius, R_o	46 cm
Machine aspect ratio	5.75
Toroidal magnetic field, B_{to}	0.45 — 0.6 T
Plasma current, I_p	up to 8 KA
Maximum density, n_{em}	0.6 — 1× 10^{19} m^{-3}
Electron temperature, T_e	150 — 250 eV

Table 1: ISTTOK main parameters.